

## **TESIS DOCTORAL**



# **Métodos y técnicas de prospección arqueológica en cavidades sumergidas**

**Manuel José Fumás Soldevilla**

Directores;

Dr. Joan Daura Luján

Dr. Antoni Palomo Pérez

**Departamento de Historia, Geografía y Filosofía**

**FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS**

---

Programa de Doctorado en Historia y Arqueología Marítimas

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO EN ESTUDIOS DEL MAR

-CEIMAR-

**UNIVERSIDAD DE CÁDIZ**



***A mis hijos Leo y Pau, a mis padres y  
como siempre a Ana.***

*“Nuestra peor experiencia en buceo, después de más de cinco mil inmersiones, no nos llegó en el mar sino en una cueva interior inundada, en la famosa Fuente de Vaucluse, cerca de Avignon” *The Silent World*” (Cousteau y Dumas, 1965).*



## **AGRADECIMIENTOS**

La redacción de una tesis doctoral a tiempo parcial pasa inevitablemente por una serie de fases ineludibles de planificación, investigación y redacción en las cuales un doctorando debe solicitar ayuda a diferentes expertos en cada materia para cumplir con los objetivos marcados. En este caso, durante siete años, no se ha realizado una investigación somera basada en estudios bibliográficos pretéritos con un afán de mejora, sino que se han constituido, desde una base casi inexistente, una idea, varios proyectos arqueológicos y una redacción sobre los estudios empíricos realizados, es decir, basados en la experiencia y en la observación de los hechos. Por esta razón, el número de personas que me han ayudado en cada uno de los momentos difíciles es cuantioso y debo corresponderles, aunque sea mínimamente, con todo mi agradecimiento y reconocimiento.

En primer lugar, quiero agradecer la confianza y la gran ayuda prestada a los directores de esta tesis denominada “Métodos y técnicas de prospección arqueológica en cavidades sumergidas”, el Dr. Joan Daura Luján y el Dr. Antoni Palomo Pérez. También, a mi primer tutor de tesis el Dr. Xavier Nieto Prieto quien me orientó y aconsejó sobre la senda que debía escoger para disfrutar con la investigación mientras ésta se lleve a cabo y a mi tutor actual el Dr. Vicente Castañeda Fernández quien me ha asesorado y acompañado en todo momento.

El hecho de redactar una tesis basada en la experiencia del trabajo de campo exprimido y concentrado en varios proyectos arqueológicos me obliga a contextualizar mis agradecimientos hacía cada una de esas personas que me empujaron y alentaron en los momentos difíciles a continuar con la investigación.

## **AGRADECIMIENTOS DEL PROYECTO COVES DEL GARRAF Y COLLS MIRALPEIX**

Sin lugar a duda, mi primer agradecimiento debe ser para el director de la Carta Arqueológica Subacuática de Sitges, D. Pere Izquierdo i Tugas, por confiar en mi en los diferentes proyectos materializados en la carta subacuática y dejarme llevar

la dirección de la parte científica de la investigación en las cuevas del Garraf. Agradecer de nuevo al Dr. Joan Daura y a la Dra. Monserrat Sanz su colaboración en la investigación subacuática de la cova del Gegant.

#### AGRADECIMIENTOS DEL PROYECTO FALCONERA

Respecto al equipo humano que colaboró en el Proyecto Falconera quiero agradecer a D. Pere Izquierdo i Tugas y al Dr. Florian Huber por su importante colaboración, por la codirección del proyecto y por su experiencia en estudios prospectivos subacuáticos. También, a los espeleo-buceadores José Pulido, Carles Ramoneda, Delfí Roda y Joel Borrazas por su trabajo guiando al AUV. A Pablo Fraile, por su inestimable ayuda con el dominio de los sistemas de información geográfica (SIG), a Pablo Cantuel, por su trabajo en el cálculo topográfico, al Dr. Josep María Cervelló y Toni Inglés por los cálculos topográficos terrestres, ya que sin estos no se hubiera podido realizar este estudio. Además, la tarea de introducir un AUV dentro de la cavidad de la Falconera no fue una tarea fácil. Es por esto que quiero agradecer al equipo del CIRS (Centro de Investigación en Robótica Subacuática) del VICOROB (Instituto de Visión por Computador y Robótica) de la Universidad de Girona (UdG) su confianza en el proyecto, concretamente al Dr. Guillem Vallicrosa, al Dr. Pere Ridao y al Dr. Lluís Magi que hicieron posible la introducción del AUV SPARUS II dentro de la cavidad y también a Francisco Hernández del Club Marítimo del Garraf por su disposición en todo momento y por prestarnos la embarcación del puerto.

#### AGRADECIMIENTOS DEL PROYECTO IASCM

Una vez más debo agradecer a todo el fantástico equipo humano que colaboró en este importante proyecto de prospección arqueológica, desde espeleo-buceadores, arqueólogos, asesores, topógrafos y técnicos en SIG, sin los cuales no hubiera podido alcanzarse las metas propuestas en esta investigación.

Agradecer a D. Jaume Cardell por su confianza en el proyecto, a los codirectores de éste; el Dr. Francesc Gràcia Lladó y el Dr. Florian Huber por su colaboración y

estima incondicional, a Sebastià Munar Llabrés, Miguel Ángel Perelló Estelrich y Juan Perez y a su equipo de Fbe Espeleologia por tanto esfuerzo y dedicación invertido para la consecución del presente trabajo. Agradecer a John Kendall de la Global Underwater Explorers (GUE) su excelente trabajo en fotogrametría. A Jose Pulido Montero y a Álvaro Granell por su ayuda logística y su experiencia en buceo en ambientes confinados y a los espeleo-buceadores expertos en rebreather lateral y técnicos del ENC2 de SEACRAFT, Joel Borrazas y Carles Ramoneda. A los grandes profesionales del espeleobuceo Delfí Roda y Marc Pintor por su trabajo en topografía subacuática y al geólogo y experto en mapeo por hilo, el Dr. Javier Lario. También a los miembros del Grupo Especial de Actividades Subacuáticas (GEAS) de Mallorca por su colaboración y apoyo en los trabajos arqueológicos y por garantizar la seguridad.

También agradecer su esfuerzo al técnico electrónico Juan Leandro Ronda García de EXTOPOCIEN por sus estudios en radiolocalización y radiogoniometría. Y por supuesto, al equipo de la Asociación Nacional de Arqueología Subacuática (SONARS), sin los cuales hubiera sido imposible realizar este trabajo. A Antonio Jesús Talavera Montes, Rafael Castán Andolz, Pablo Fraile Fraile y Alberto García Montes de Oca. Por último, agradecer la ayuda de Pablo Cantuel González, de Topografía Pangea, por apostar por el proyecto y hacerlo aún más grande y a los colaboradores externos que nos asesoraron en todo momento cuando tuvimos problemas como Ken Smith, por prestarnos su PINGER de radiolocalización, a Sebastien Kister, por orientarnos en el uso del MNEMO, a Miguel Ángel Cau Ontiveros, por facilitarnos la logística en la primera campaña del proyecto, a Enric Colom, por su asesoramiento arqueológico en la cova de la Font de Ses Aiguades y a las zooarqueólogas Alba Ruiz Cros y la Dra. Cristina Fernández Laso por sus consejos en el estudio de los restos paleontológicos.



# ÍNDICE;

## AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS DEL PROYECTO COVES DEL GARRAF Y COLLS MIRALPEIX

AGRADECIMIENTOS DEL PROYECTO FALCONERA

AGRADECIMIENTOS DEL PROYECTO IASCM

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. ESTUDIOS PREVIOS Y MARCO NORMATIVO .....	4
1.2. HACIA UNA IDEA CONCEPTUAL DEL TÉRMINO PROSPECCIÓN .....	6
1.3. HACIA UN NUEVO CONCEPTO METODOLÓGICO DE PROSPECCIÓN .....	8
<b>2. OBJETIVOS GENERALES DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>14</b>
<b>3. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....</b>	<b>20</b>
3.1. LA PROBLEMÁTICA GLOBAL EN LA ARQUEOLOGÍA SUBACUÁTICA EN CAVIDADES CÁRSTICAS SUMERGIDAS.....	21
3.2. TIPOS DE PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE DEPOSITO .....	24
3.3. PRESENTE DE LA INVESTIGACIÓN PROSPECTIVA EN CUEVAS SUMERGIDAS ....	25
3.4. LA IMPORTANCIA DE LA GEORREFERENCIACIÓN TOPOGRÁFICA EN LA PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA.....	26
3.5. VISIÓN HISTORIOGRÁFICA DE LA ARQUEOLOGÍA EN CUEVAS CÁRSTICAS SUMERGIDAS .....	28
3.5.1. Historiografía de las cavidades sumergidas de la península ibérica con evidencias arqueológicas.....	34
3.5.1.1. <i>Las cuevas sumergidas de Mallorca</i> .....	34
3.5.2. Historiografía de las cavidades litorales en la península ibérica con evidencias arqueológicas.....	35
3.5.2.1. <i>La cueva C-6</i> .....	36
3.5.2.2. <i>La cueva de los Aviones</i> .....	37
3.5.2.3. <i>La cueva Vanguard en Gibraltar</i> .....	38
3.5.2.4. <i>El Complejo del Humo</i> .....	40
3.5.3. Historiografía de otras cavidades litorales.....	41
3.5.3.1. <i>La cueva Furninha</i> .....	41
3.5.3.2. <i>La cueva de Figueira Brava</i> .....	42
<b>4. CONTEXTO GEOLÓGICO .....</b>	<b>46</b>
4.1. BREVE DEFINICIÓN DE CAVIDAD SUBACUÁTICA Y SISTEMAS CÁRSTICOS .....	46
4.2. OSCILACIONES CLIMÁTICAS Y DEL NIVEL DEL MAR .....	49
<b>5. METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>54</b>

5.1. EL REGISTRO GRÁFICO SUBACUÁTICO Y LOS OBJETIVOS DE LA PLANIMETRÍA MANUAL .....	54
5.2. LOS LEVANTAMIENTOS GRÁFICOS .....	55
5.3. LAS TÉCNICAS TOPOGRÁFICAS MANUALES .....	55
5.3.1. La triangulación .....	56
5.3.2. Eje Cartesiano.....	57
5.3.3. Cuadrícula individual rígida.....	57
5.4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE TOPOGRAFÍA EN CUEVAS SUMERGIDAS.....	58
5.4.1. Lecturas del acimut.....	60
5.4.2. Mediciones de distancias .....	60
5.4.3. Mediciones de las paredes.....	60
5.4.4. El sistema de coordenadas.....	61
5.4.5. Conversión a proyección rectilínea .....	62
5.4.6. Cálculo de las coordenadas cartesianas .....	62
5.4.7. Programas de cartografía de cuevas .....	63
5.5. LA METODOLOGÍA PROSPECTIVA ACTUAL .....	64
5.6. MÉTODOS PROSPECTIVOS DIRECTOS UTILIZADOS .....	67
5.6.1. La prospección visual .....	67
5.6.1.1. <i>Prospección visual lineal primaria</i> .....	69
5.6.1.2. <i>Prospección visual lineal secundaria</i> .....	69
5.6.1.3. <i>Prospección lineal terciaria</i> .....	70
5.6.1.4. <i>Prospección visual pendular</i> .....	70
5.6.2. Aplicación de la radiolocalización en la prospección arqueológica subacuática en cuevas sumergidas .....	71
5.6.2.1. <i>Objetivos de esta metodología</i> .....	72
5.6.2.2. <i>El dispositivo PINGER</i> .....	73
5.6.2.2.1. <i>Uso del PINGER</i> .....	74
5.6.2.3. <i>El Sistema de radiolocalización SUMMER</i> .....	75
5.6.2.3.1. <i>El proceso de toma de datos</i> .....	76
5.6.2.3.2. <i>El emisor de baliza sumergible SUMMER</i> .....	77
5.6.2.3.3. <i>El receptor WINTER</i> .....	78
5.6.2.3.4. <i>El dispositivo móvil</i> .....	79
5.6.3. El geoposicionamiento con GPS diferencial .....	81
5.6.4. Métodos y objetivos de la topografía interna.....	81
5.6.4.1. <i>El mapeo por hilo con el dispositivo MNEMO</i> .....	82
5.6.4.2. <i>El sistema de registro y navegación subacuática ENC2 de SEACRAFT</i> .....	84

5.6.4.3. <i>La medición por ecosonda manual</i> .....	85
5.6.4.4. <i>Uso de vehículos sumergibles autónomos AUV</i> .....	86
5.6.5. <i>Objetivos y métodos directos aplicados a la documentación arqueológica subacuática</i> .....	87
5.6.6.1. <i>La fotogrametría como método de documentación</i> .....	89
5.6.6.1.1. <i>El modelado digital 3D</i> .....	90
5.6.6.1.2. <i>La problemática en la manipulación fotogramétrica</i> .....	90
5.6.6.2. <i>La fotografía y la filmación en video</i> .....	92
5.7. <b>LOS MÉTODOS INDIRECTOS O DE MUESTREO APLICADOS EN LA TESIS</b> .....	93
5.7.1. <i>La contextualización espacial territorial</i> .....	94
5.7.2. <i>Prospección aérea con dron</i> .....	95
5.7.3. <i>El análisis del agua de las cavidades sumergidas</i> .....	96
5.7.2.1. <i>El análisis hidro geoquímico del agua</i> .....	98
5.7.2.2. <i>El análisis biológico del agua</i> .....	99
5.7.4. <i>La extracción de sondeos estratigráficos sedimentológicos</i> .....	100
<b>6. YACIMIENTOS Y CUEVAS PROSPECTADAS</b> .....	<b>104</b>
6.1. <b>INTRODUCCIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO</b> .....	104
6.2. <b>LA PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA SUBACUÁTICA EN CUEVAS SEMISUMERGIDAS</b> .....	107
6.2.1. <i>Las cuevas del Garraf central</i> .....	107
6.2.1.1. <i>Introducción</i> .....	107
6.2.1.2. <i>Marco jurídico</i> .....	109
6.2.1.3. <i>Marco geográfico y geológico de las cuevas del Garraf</i> .....	110
6.2.1.4. <i>Objetivos generales de la prospección</i> .....	111
6.2.1.5. <i>Las cuevas semisumergidas a estudio</i> .....	113
6.2.1.5.1. <i>La cova de la Xarxa</i> .....	113
6.2.1.5.2. <i>La cova del Congre</i> .....	115
6.2.1.5.2.1. <i>Historia de la investigación arqueológica de la cavidad</i> .....	117
6.2.1.5.3. <i>La cova del Pebre</i> .....	117
6.2.1.5.3.1. <i>Historia de la investigación</i> .....	119
6.2.2. <i>Las cuevas del Garraf meridional: Colls-Miralpeix</i> .....	119
6.2.2.1. <i>La cova del Gegant</i> .....	120
6.2.2.1.1. <i>Historia de la investigación arqueológica de la cavidad</i> .....	121
6.2.2.1.2. <i>Objetivos e hipótesis de estudio</i> .....	123
6.3. <b>LA PROSPECCIÓN EN CUEVAS SUBMARINAS</b> .....	125
6.3.1. <i>La Falconera</i> .....	125

6.3.1.1. Contexto geográfico y arqueológico .....	125
6.3.1.2. Historia de la exploración de la cavidad y la problemática de la topografía subacuática.....	128
6.3.1.3. Hacia una hipótesis de estudio arqueológico .....	133
6.3.1.4. Objetivos propuestos en el proyecto.....	135
<b>6.4. LA PROSPECCIÓN EN CUEVAS SUMERGIDAS INTERIORES DE AGUA DULCE.....</b>	<b>137</b>
6.4.1. El proyecto IASCM .....	137
6.4.1.1. Marco jurídico.....	139
6.4.1.2. Marco geográfico.....	139
6.4.1.3. Objetivos generales del proyecto de investigación .....	140
6.4.1.4. Historia de la investigación y la exploración mallorquina.....	141
6.4.1.5. Distribución geográfica de las cuevas con restos arqueológicos.....	142
6.4.1.6. Contextualización cronológica e histórica de los yacimientos arqueológicos.....	144
6.4.1.7. Cavidades con hallazgos arqueológicos en las que no se ha intervenido .....	145
6.4.1.7.1. La cova des Dolç.....	145
6.4.1.7.2. La cova des Drac des Rafal des Porcs .....	147
6.4.1.7.3. La cova des Coll .....	148
6.4.1.7.4. La cova del Sistema Pirata Pont-Piqueta.....	149
6.4.1.8. Cavidades con restos arqueológicos en las que se ha intervenido .....	150
6.4.1.8.1. La cova des Drac de Cala Santanyí.....	150
6.4.1.8.2. La cova del Sistema Sa Gleda–Camp des Pou .....	151
6.4.1.8.3. La cova Genovesa o d'en Bessó.....	153
6.4.1.8.3.1. Descripción geográfica e histórica.....	153
6.4.1.8.3.2. Contexto arqueológico .....	155
6.4.1.8.4. La cova de la Font de Ses Aiguades.....	157
6.4.1.8.4.1. Descripción geográfica e histórica.....	157
6.4.1.8.4.2. El yacimiento arqueológico.....	159
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>164</b>
7.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CUEVAS DEL GARRAF.....	164
7.1.1. La cova de la Xarxa.....	164
7.1.2. La cova del Congre.....	165
7.1.3. La cova del Pebre.....	166
7.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CUEVA SEMISUMERGIDA DEL GEGANT.....	167
7.2.1. Resultados topográficos y arqueológicos .....	169

7.2.2. Sondeo arqueológico prospectivo mediante extracción de sondeos estratigráficos .....	172
7.2.2.1. Registro estratigráfico obtenido .....	172
7.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA COVA DE LA FALCONERA .....	176
7.3.1. Resultados topográficos.....	176
7.3.1.1. Método prospectivo de mapeo volumétrico con ecosonda multihaz. AUV SPARUS II.....	176
7.3.1.2. Método prospectivo de mapeo por hilo. MNEMO .....	180
7.3.1.3. La topografía terrestre para la obtención de coordenadas .....	182
7.3.2. Métodos prospectivos manuales complementarios .....	185
7.3.3. Análisis de los resultados mediante técnicas SIG .....	188
7.3.4. Resultados finales en la obtención de los puntos de control y referencia ...	189
7.4. RESULTADOS DEL PROYECTO IASCM.....	190
7.4.1. Resultados de los trabajos arqueológicos prospectivos del Proyecto IASCM190	
7.4.2. Resultados obtenidos en la cova des Drac de Cala Santanyí .....	190
7.4.2.1. Resultados topográficos y arqueológicos.....	190
7.4.3. Resultados obtenidos en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou.....	197
7.4.3.1. Resultados topográficos y arqueológicos.....	199
7.4.3.1.1. El Sistema de radiolocalización PINGER y SUMMER .....	200
7.4.3.1.2. El sistema de mapeo por hilo MNEMO.....	204
7.4.3.1.2.1. Evaluación externa de los resultados. El KECP .....	206
7.4.3.1.3. El sistema de mapeo con GPS del dispositivo ENC2 de SEACRAFT ..	207
7.4.3.2. Resultados generales obtenidos en las campañas de prospección.....	209
7.4.3.2.1. La obtención de la coordenada real de inicio de las líneas topográficas .....	210
7.4.3.2.2. Lecturas obtenidas del sistema de mapeo por hilo MNEMO.....	211
7.4.3.2.3. Lecturas obtenidas del sistema de mapeo ENC2 de SEACRAFT .....	213
7.4.3.2.4. La topografía obtenida de la sala aérea de la Sala de los Moros ...	217
7.4.3.2.5. Resultados del uso del ecosonda manual .....	225
7.4.3.2.6. Resultados de la aplicación de métodos topográficos convencionales de superficie .....	226
7.4.3.2.7. Resultado de los cálculos en la obtención de coordenadas georreferenciadas.....	229
7.4.3.3. Resultados complementarios obtenidos con ciencias auxiliares .....	234
7.4.3.3.1. Resultados del estudio del perfil hídrico con sonda CDT .....	234
7.4.4. Resultados metodológicos obtenidos en la cova Genovesa o d'en Bessó....	236
7.4.4.1. Resultados topográficos.....	240

7.4.4.1.1. El sistema de mapeo por hilo MNEMO .....	241
7.4.4.1.2. La obtención de la coordenada real de inicio de la línea del MNEMO .....	243
7.4.4.1.3. La problemática en la recepción del emisor SUMMER .....	245
7.4.4.1.4. El sistema de mapeo ENC2 de SEACRAFT .....	247
7.4.4.2. Resultados arqueológicos y paleontológicos de la prospección visual ..	249
7.4.4.3. Resultados del proceso fotogramétrico y de documentación .....	251
7.4.4.4. Resultados de los estudios complementarios .....	258
7.4.4.4.1 Análisis sedimentológico con sondeos estratigráficos .....	259
7.4.5. Resultados metodológicos obtenidos en la cova de la Font de Ses Aiguades	262
7.4.5.1. Resultados topográficos .....	268
7.4.5.1.1. El uso del sistema de radiolocalización PINGER .....	268
7.4.5.1.2. La lectura del mapeo por hilo. El dispositivo MNEMO .....	270
7.4.5.1.3. Metodología usada para la obtención de la coordenada del Punto O de referencia .....	272
7.4.5.2. Resultados del proceso fotogramétrico y de documentación .....	277
7.4.5.2.1. Resultados en la progresión del primer proceso fotogramétrico ....	277
7.4.5.2.2. Hacia un modelo fotogramétrico completo .....	280
7.4.5.2.3. El estudio fotogramétrico de las piezas cerámicas individuales ....	283
7.4.5.2.4. Geoposicionamiento final de las piezas cerámicas según modelo fotogramétrico .....	285
7.4.5.2.5. La prospección arqueológica pendular y el registro de piezas cerámicas .....	288
7.4.5.2.6. Comparación de los resultados entre ambas técnicas .....	292
7.4.5.3. La documentación fotográfica .....	294
7.4.5.4. Aplicación de ciencias auxiliares a la prospección arqueológica .....	295
7.4.5.4.1. Aplicación de la colorimetría en el estudio arqueológico .....	295
7.4.5.4.2. Resultados del estudio paleontológico de la cavidad .....	299
7.4.5.4.3. Resultados del estudio analítico del agua .....	301
7.4.5.4.3.1. Resultados del análisis del agua con sonda CDT .....	301
7.4.5.4.3.2. Resultados del estudio químico del agua .....	303
7.4.5.4.3.3 El análisis biológico del agua .....	304
<b>8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>310</b>
8.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS HISTÓRICOS Y METODOLÓGICOS POR CAVIDADES .....	310
8.1.1. Las cuevas del Garraf .....	312
8.1.1.1. Interpretación metodológica .....	312

8.1.1.2. Interpretación histórica y arqueológica .....	312
8.1.2. La cova del Gegant.....	313
8.1.2.1. Interpretación metodológica .....	313
8.1.2.1.1. Futuro de la prospección en la cova del Gegant .....	314
8.1.3. La cova de la Falconera .....	315
8.1.3.1. Interpretación metodológica .....	315
8.1.3.1.1. Valoración topográfica .....	315
8.1.3.2. Interpretación histórica .....	316
8.1.4. La cova des Drac de Cala Santanyí.....	318
8.1.4.1. Interpretación metodológica .....	318
8.1.4.2. Interpretación histórica y arqueológica .....	319
8.1.5. La cova del Sistema Sa Gleda–Camp des Pou .....	320
8.1.5.1. Interpretación metodológica .....	320
8.1.5.1.1. Valoración de los resultados topográficos.....	321
8.1.5.2. Interpretación histórica y arqueológica .....	323
8.1.5.2.1. Contextualización espacial territorial de la cavidad.....	323
8.1.6. La cova de la Font de Ses Aiguades .....	329
8.1.6.1.1. Valoración de los resultados fotogramétricos obtenidos .....	330
8.1.6.1.2. Valoración de los resultados topográficos.....	333
8.1.6.1.3. Valoración del registro manual de piezas cerámicas y puntos de control.....	334
8.1.6.1.4. Valoración de la seguridad e higiene del agua .....	335
8.1.6.2. Interpretación histórica y arqueológica .....	336
8.1.6.2.1. El estudio arqueológico de la cueva .....	337
8.1.6.2.2. El estudio paleontológico de los restos óseos de la cueva.....	341
8.1.6.2.3. Contextualización histórico territorial de la cavidad.....	344
8.1.6.2.3.1 Hipótesis histórica .....	350
8.1.7. La cova Genovesa o d'en Bessó.....	353
8.1.7.1. Interpretación metodológica .....	353
8.1.7.1.1. Valoración de los resultados topográficos.....	353
8.1.7.1.2. Valoración de los resultados fotogramétricos obtenidos .....	355
8.1.7.1.3. Valoración de la seguridad e higiene del agua .....	356
8.1.7.2. Interpretación histórica y arqueológica .....	357
8.1.7.2.1. Contextualización histórico territorial de la cavidad.....	358
8.1.7.2.2. El estudio paleontológico de la cavidad .....	361
8.1.7.2.3. Hipótesis histórica .....	361

8.2. DISCUSIÓN SOBRE LOS OBJETIVOS.....	362
8.2.1. Objetivos alcanzados .....	363
8.3. DISCUSIÓN HISTÓRICA.....	365
8.4. DISCUSIÓN Y SINTESIS METODOLOGICA .....	367
8.4.1. Fase 1. Planificación del proyecto .....	369
8.4.1.1. <i>Objetivos</i> .....	369
8.4.1.2. <i>Planificación</i> .....	369
8.4.1.3. <i>Financiación</i> .....	370
8.4.1.4. <i>Recursos materiales (aire, CCR, scooter, dispositivos electrónicos, etc.)</i> 371	
8.4.1.4.1. <i>Gases</i> .....	371
8.4.1.4.2. <i>Escúter</i> .....	372
8.4.1.4.3. <i>Dispositivos de mapeo por hilo. El MNEMO</i> .....	373
8.4.1.4.4. <i>Los dispositivos de radiolocalización</i> .....	373
8.4.1.4.5. <i>Los navegadores subacuáticos. El ENC2 de SEACRAFT</i> .....	374
8.4.1.4.6. <i>Los sistemas topográficos y los GPS profesionales</i> .....	375
8.4.1.4.7. <i>El AUV</i> .....	376
8.4.1.4.8. <i>Las cámaras fotográficas</i> .....	377
8.4.1.5. <i>Los recursos humanos</i> .....	378
8.4.1.6. <i>Los recursos logísticos</i> .....	378
8.4.1.7. <i>Organización de la inmersión y el plan de seguridad</i> .....	380
8.4.2. Fase 2. Seguridad y documentación .....	384
8.4.2.1. <i>La prospección visual</i> .....	384
8.4.2.2. <i>Inspección del estado de la cavidad y del hilo guía</i> .....	385
8.4.2.3. <i>La filmación en video</i> .....	386
8.4.2.4. <i>La toma de fotografías y la fotogrametría</i> .....	387
8.4.3. Fase 3. Métodos para la documentación georreferenciada .....	390
8.4.3.1. <i>La observación manual de la poligonal de ida y vuelta. Dispositivo MNEMO</i> .....	391
8.4.3.2. <i>El replanteo en superficie del punto final. Emisor y receptor radiolocalización</i> .....	391
8.4.3.3. <i>La observación de la poligonal de ida y vuelta con navegador ENC2 de SEACRAFT</i> .....	392
8.4.3.4. <i>La observación volumétrica con sonda multihaz sobre AUV desde un punto conocido</i> .....	393
8.4.3.5. <i>La topografía subacuática de radiación y método de líneas</i> .....	394
8.4.3.6. <i>La topografía de superficie</i> .....	395

8.4.3.7. La documentación georreferenciada del yacimiento y su contextualización espacial .....	395
8.4.4. Fase 4. Los métodos complementarios a la prospección .....	396
8.4.4.1. El Análisis SIG.....	396
8.4.4.2. El uso de drones .....	397
8.4.4.3. Análisis sedimentológico con sondeos estratigráficos .....	398
8.4.4.4. El análisis de la cerámica.....	399
8.4.4.5. Aplicación de la colorimetría en el estudio arqueológico.....	400
8.4.4.6. El estudio de los restos paleontológicos.....	401
8.4.4.7. Estudio del perfil hídrico con sonda CDT .....	402
8.4.4.8. El análisis de agua (biológico y químico).....	402
8.4.5. Fase 5. Los métodos de divulgación .....	403
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>410</b>
<b>10. FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>416</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>419</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>451</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICOS .....</b>	<b>474</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>476</b>
<b>WEBS DE INTERÉS.....</b>	<b>479</b>
<b>ANEXO I. TOPOGRAFÍAS .....</b>	<b>480</b>
COVA DE LA FALCONERA.....	480
COVA DEL GEGANT.....	481
COVA GENOVESA O D'EN BESSÓ .....	482
COVA DE LA FONT DE SES AIGUADES.....	483
COVA DES DRAC DE CALA SANTANYÍ .....	484
COVA DEL SISTEMA SA GLEDA-CAMP DES POU.....	485
<b>ANEXO II. TÉCNICAS FUNDAMENTALES QUE DESARROLLAR EN EL ESPELEOBUCEO ...</b>	<b>486</b>
FLOTABILIDAD.....	486
TRIMADO .....	487
PROPULSIÓN .....	488
RESPIRACIÓN .....	488
CONTROL FÍSICO Y MENTAL .....	489
TIPOS DE CONFIGURACIÓN .....	489
EQUIPO Y MATERIAL BÁSICO DE INMERSIÓN EN CUEVAS .....	491
BOTELLAS.....	491
MATERIAL .....	491

GRIFERÍAS .....	492
CONEXIONES H E Y .....	492
MANIFOLDS .....	492
REGULADORES .....	493
MANÓMETROS SUMERGIBLES .....	493
COMPENSADORES DE FLOTABILIDAD .....	493
MÁSCARAS.....	494
ALETAS.....	494
ELEMENTOS DE CORTE .....	495
LUCES .....	495
PIZARRAS Y CUADERNOS SUMERGIBLES.....	496
ORDENADORES, TABLAS, Y TIEMPO DE FONDO .....	496
MARCAS, FLECHAS Y COOKIES .....	499
CARRETES .....	499
CASCOS.....	499
EL BRIEFING .....	500
<b>ANEXO III. EL CONTEXTO JURÍDICO DEL ESTUDIO ARQUEOLÓGICO EN CUEVAS SUMERGIDAS .....</b>	<b>501</b>
EL CONTEXTO JURÍDICO DEL BUCEO EN CUEVAS SUMERGIDAS .....	504
EL CONTEXTO JURÍDICO DEL BUCEO CON AIRE EN ESPAÑA .....	507

## ABSTRACT

This thesis, mainly methodological, addresses the deployment of different archeological prospecting techniques and the use of distinct devices able to generate new data in multidisciplinary research. Moreover, far from discussing the bibliographic and methodological review of the works carried out so far, this thesis aims to improve and complement the previous studies as well to show the different types of techniques and methodologies used in our own research, focused mainly on achieving a correct geo-position of the submerged archeological site.

To this effect, interventions have been made in different submerged caves on the Barcelona coast and the island of Majorca. This has undoubtedly allowed us to assess their degree of performance and usefulness, the type of synergies necessary for that purpose and the most appropriate methodology at any time. Thus, it has been possible to generate an effective progression of the main expertise and technical solutions currently available.

In addition, a series of procedure recommendations are suggested within a specific methodological action protocol directed to the creation of a reliable, rigorous, and safe working protocol.

On one hand, the ultimate intention has been to draw conclusions allowing us to assess the best methods, techniques, ways, and manners of working in every distinct case we may face while undertaking an archeological activity in an underwater karstic cave or in the submerged outer part of it. On the other hand, and due to the new data provided in this research, new archeological hypotheses have been formulated regarding the usability of these caves in ancient times, thus complementing the previous studies on the matter for each archeological and paleontological site under review.

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

*“Hay sitios que hasta ahora han desafiado los pensamientos de una excavación adecuada, pero que sin embargo han producido tesoros únicos de artefactos, son los cenotes, o pozos, de la península de Yucatán en México (Bass, 1966a).*

*George Bass (1932-2021)*

## 1. INTRODUCCIÓN

La arqueología desde hace unas décadas ha comenzado a abrazar una gran cantidad de especialidades que complementan un abanico multidisciplinar capaz de contextualizar, entender y reconstruir las sociedades del pasado de una forma mucho más ajustada con la realidad. Una de estas nuevas especialidades es la arqueología subacuática en general, y la desarrollada en contextos restringidos, como las cavidades sumergidas, en particular.

Pero ¿qué es la arqueología de las cuevas sumergidas?, ¿existe algo similar a la arqueología en contextos cársticos? ¿la investigación arqueológica en cuevas sumergidas enfrenta los mismos problemas que otras disciplinas, como la arqueología subacuática, o tan solo es una especialidad de esta última? El pionero en la arqueología subacuática, George Bass, argumentó que la arqueología en las montañas o en la jungla se conocían simplemente como arqueología, al igual que la arqueología subacuática (Bass, 1966b). Pocos años más tarde, Nicolas Flemming señaló que, “*Nadie ha oído hablar nunca de la arqueología de la selva, la arqueología de los pantanos, la arqueología del desierto, la arqueología del ártico o la arqueología del paracaidismo*” (Flemming, 1972), es decir, el objetivo principal de la arqueología no es ni el entorno que contiene, ni los artefactos, ni los métodos utilizados para registrarlos, sino la reconstrucción del pasado, el conocimiento de la cultura y los comportamientos humanos a través de los restos. Por ello, “*Si no hay un tema unificador bajo el agua, entonces la 'arqueología subacuática' no es más significativa que la 'arqueología de los pantanos'*” (Flemming, 1972; Campbell, 2018a).

Actualmente la arqueología subacuática en cuevas es una especialidad relativamente minoritaria debido a su alto nivel de especialización, a la necesidad de conocimientos avanzados en las técnicas de buceo, de mezcla de gases y de procesos descompresivos, y, también, al alto coste económico de las intervenciones.

Desde un punto de vista arqueológico y etnográfico, las cavidades han tenido múltiples funciones que incluyen, entre otros, cobijo y refugio, espacio funerario,

protección del ganado, o usos simbólicos y artísticos (García y Morel, 1995; Valladas *et al.*, 2001; Ramis y Santandreu, 2011; Moyes, 2012; Campbell, 2017). Por este motivo, las investigaciones arqueológicas se han concentrado en el estudio de las cavidades desde múltiples aspectos que incluyen, entre otros, los registros estratigráficos y los artefactos arqueológicos como método para interpretar el modo de vida de las sociedades del pasado (Blasco *et al.*, 1981; J. Daura *et al.*, 2010). Además, las cavidades son puntos de referencia en el espacio terrestre y marítimo de fácil visibilidad y localización, lo cual ha convertido estos lugares en puntos de referencia para la investigación arqueológica (Marlasca y López, 2014; Gómez, 2018).

Actualmente, la arqueología terrestre dispone de un corpus metodológico ampliamente definido por una gran cantidad de manuales estructurados por disciplinas científicas concretas, con protocolos de actuación perfectamente definidos (Renfrew y Bahn, 1993; Carandini, 1997; Domindo, Burke y Smith, 2007; Bahn y Renfrew, 2008). Sin embargo, en el caso de la metodología de prospección en cuevas sumergidas no disponemos de tantas referencias metodológicas que hayan sistematizado los protocolos de actuación. En este sentido, la arqueología subacuática en cavidades difícilmente encuentra respuestas de carácter general como; ¿cómo desarrollar una investigación arqueológica científica en una cavidad inundada?, ¿cuál es el método de prospección más adecuado que nos proporcione unas mínimas garantías de éxito arqueológico, de aprovechamiento y ahorro de tiempo y de reducción de costes? La respuesta no aparece en ningún manual ni libro especializado en la materia, puesto que la mayor parte de los trabajos se centran en estudios de carácter específico o, directamente, tratan sobre protocolos aplicados al buceo recreativo, lo cual se aleja de las necesidades explícitas arqueológicas. Pero, por otro lado, también cabe preguntarse ¿qué trabajos arqueológicos son necesarios?, ¿qué garantías de seguridad, de control de equipos, de viabilidad metodológica, de aplicabilidad técnica tienen esos métodos prospectivos aplicados en las prospecciones que se llevan a cabo en las distintas cuevas sumergidas alrededor del mundo?

Tras varios años de recopilación de datos, de lectura de los diferentes trabajos, de publicaciones al respecto y de conversaciones con distintos espeleo-buceadores y arqueólogos de cuevas hemos observado que no hay una estrategia común

definida, y que mucho menos hay un criterio metodológico unificado a nivel global que haya sido desarrollado con éxito (Huber, 2014). Esto, puede ser debido a múltiples factores como; la alta especialización técnica necesaria para llevarlos a cabo o la gran dificultad de desarrollar trabajos en cavidades inundadas como; la escasa iluminación, la presencia de partículas en suspensión, la haloclina, la termoclina, la percolación, la baja temperatura del agua, etc. Evidentemente, a estos factores hay que añadirle los costes económicos que implica realizar intervenciones arqueológicas en estos ambientes confinados. Y, por último, y más importante el peligro intrínseco que comporta bucear en espacios cerrados, con la única ayuda de una linterna y un hilo guía que nos ubique espacialmente dentro de la cavidad y, a la vez, nos señale la salida en caso de emergencia (Al Hamdani *et al.*, 2012).

Es por este motivo que, el factor de seguridad tiene un rol muy importante y a su vez limitante en estos tipos de intervenciones arqueológicas en las cuales el margen de error es mínimo (Gregory y Manders, 2015). La facilidad con la que se levantan las partículas de sedimento en suspensión, que anulan la visión en segundos, es realmente un factor que limita altamente la seguridad y, por consiguiente, los trabajos arqueológicos (Campbell, 2017). Tan solo desde la preparación exhaustiva del equipo de investigación encargado del trabajo de campo, de la planificación meticulosa del mismo y de la realización de las técnicas prospectivas y de excavación adecuadas es posible conseguir el desarrollo progresivo de los objetivos marcados que garanticen la seguridad y, a su vez, nos permitan obtener resultados científicos satisfactorios.

Todo ello es lo que ha motivado la presente tesis. Por esta razón, a lo largo de la misma evaluaremos las diferentes técnicas utilizadas hasta ahora en las distintas intervenciones arqueológicas y veremos qué ventajas e inconvenientes presentan las mismas. Pero, además, lejos de pretender un estudio bibliográfico y metodológico de los trabajos realizados hasta la fecha, el presente trabajo mostrará los distintos tipos de metodología utilizados en nuestro propio estudio en diferentes cavidades sumergidas de la costa barcelonesa y de la isla de Mallorca. Esto, sin duda, nos ha permitido valorar el tipo de rendimiento y utilidad obtenido por las mismas, el tipo de sinergias que son necesarias para su consecución y el conocimiento sobre que metodología es la más adecuada en cada momento. De

este modo, se ha conseguido generar una progresión efectiva de los principales conocimientos y soluciones técnicas de que se dispone hasta la fecha. La intención final ha sido, extraer conclusiones que nos permitan valorar los mejores métodos, técnicas, formas y modos de trabajar en cada una de las distintas casuísticas que nos podemos encontrar cuando desarrollamos una actividad arqueología en una cueva sumergida, con el objetivo puesto en la generación de un protocolo de trabajo fiable, riguroso y seguro.

### 1.1. ESTUDIOS PREVIOS Y MARCO NORMATIVO

En primer lugar, tal y como ya hemos mencionado, hay que señalar que la presente investigación, ha partido de la dificultad en encontrar un corpus metodológico que sintetice las técnicas prospectivas precedentes y que nos permita evaluar los puntos fuertes y débiles de cada una de las técnicas que actualmente se conocen. Una de las principales obras de referencia, y en la que se apoya parte del desarrollo de la tesis, es el libro “The Archaeology in Underwater Caves” (Campbell, 2016) el cual consta de una recopilación de datos y estudios llevados a cabo en diferentes cuevas sumergidas alrededor del mundo, aunque en esta obra apenas encontramos referencia sobre qué tipos de metodologías se han utilizado en cada uno de los casos y el por qué. En cambio, sí que se analiza de manera más detallada qué lugares son los más proclives de acierto en la búsqueda de restos arqueológicos, diferenciando claramente entre los conceptos de depósito directo y depósito indirecto, es decir, existe una división importante entre las cuevas que en el pasado estuvieron secas y posteriormente se inundaron y las cuevas que siempre han estado sumergidas. Las cuevas que estuvieron secas en el pasado son proclives a conservar restos arqueológicos, resultado de la actividad antrópica realizada en su interior, lo que denominaríamos depósito directo, mientras que las cuevas que han permanecido siempre inundadas, pero en los que se han encontrado también restos arqueológicos en su interior, forman parte de las denominadas de depósito indirecto puesto que el origen de esos restos arqueológicos es ajeno a una actividad intrínseca en su interior, ya sea por ser un punto de abastecimiento de agua (Gràcia *et al.*, 2001) o por ser un lugar de ofrendas (Warmenbol, 2004, 2014) entre otras casuísticas.

Finalmente, la propia obra hace hincapié en que uno de los puntos importantes para avanzar en la arqueología subacuática en cuevas es precisamente mejorar en las metodologías prospectivas (Campbell, 2018).

Por este motivo y siguiendo las recomendaciones de Campbell (Campbell, 2018), el presente trabajo pretende analizar, lo más detalladamente posible, los diferentes casos que nos podemos encontrar en el estudio arqueológico de las cuevas sumergidas, tanto desde el punto de vista arqueológico como en el metodológico y técnico. Para ello describiremos los trabajos realizados en cada una de las cuevas donde hemos intervenido y analizaremos en detalle el porqué de nuestra elección metodológica en cada uno de los casos y que soluciones técnicas se han adoptado. Como veremos, la complejidad intrínseca de cada una de las cuevas hace necesario un estudio previo de las condiciones físicas, geológicas y medioambientales en las que se desarrollaran los trabajos.

Por último, se debe recalcar que la arqueología subacuática en cuevas, como cualquier intervención arqueológica tiene la necesidad de cumplir con los trámites administrativos concretos que regulan el trabajo de campo. Así, se debe contar con una serie de autorizaciones específicas para cada una de las cuevas en las que se pretende intervenir, que en el estado español depende de cada una de las comunidades autónomas. En nuestro caso los marcos han sido los de Cataluña, (Decret 78/2002, de 5 de març, del Reglament de Protecció del Patrimoni Arqueològic i Paleontològic, DOGC núm. 3594, 13-03-2002, pàg. 4608) y el de Baleares (Decreto 14/2011, de 25 de febrero, por el que se aprueba la regulación de las intervenciones arqueológicas y paleontológicas de las Islas Baleares).

En la mayoría de estas, es necesario disponer de un proyecto científico avalado por una entidad competente, en nuestro caso la Universidad de Cádiz (UCA). En segundo lugar, y dependiendo del área de estudio, debemos tener la autorización de distintas administraciones y departamentos que regulan y tienen competencias al respecto como; Medio Ambiente, Costas y Patrimonio, además del beneplácito del propietario del terreno. Posteriormente, se debe configurar un equipo de profesionales con conocimientos técnicos en ambientes confinados. Por este motivo, en algunos casos a lo largo de la presente tesis hemos detallado las peculiaridades y coyunturas concretas en

cada una de las cavidades como modo de contextualización de los trabajos realizados.

Los dos principales proyectos arqueológicos que enmarcan las intervenciones arqueológicas que se han realizado y que detallaremos progresivamente, han sido los estudios realizados bajo el “Proyecto Falconera” con número de expediente 437 K121 N780 2019\_1\_23787, incluido a su vez en el expediente R/N 470 K121 N-780 2017-1-20181 de autorización de intervención arqueológica preventiva: revisión de la Carta Arqueológica Subacuática de Sitges (Sitges, Garraf), según el procedimiento establecido en el artículo 14 y a continuación del Decreto 78/2002, de 5 de marzo de 2002, del Reglamento sobre la protección del patrimonio arqueológico y paleontológico (coIP: Manel J. Fumás) y el “Proyecto Investigación Arqueológica Subacuática en las Cuevas de Mallorca (IASCM)” con el número de expediente 0337SET2019ARQ24219 (coIP: Manel J. Fumás).

## 1.2. HACIA UNA IDEA CONCEPTUAL DEL TÉRMINO PROSPECCIÓN

Sin duda, uno de los primeros pasos que debemos afrontar es el propio concepto del término prospección, sobre todo cuando nos referimos a metodologías de prospección o técnicas aplicadas al desarrollo y mejora de la prospección arqueológica en cavidades sumergidas.

En la actualidad, la legislación estatal española en su Artículo 42 del Título IV de la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español define la prospección como la exploración superficial, sin remoción de terreno, dirigida al estudio, investigación o examen de datos sobre toda clase de restos históricos, así como los componentes geológicos con ellos relacionados (León, 2003). Tal es así que en las últimas décadas, tanto la arqueología como la geología, han desarrollado una gran cantidad de métodos prospectivos y de técnicas de análisis del terreno sin remoción (LIDAR, tomografía, geo-radar, sondas visuales, etc.) que permiten evaluar la potencialidad de los yacimientos arqueológicos de manera preventiva (Fiorani *et al.*, 2000; Fernández, 2011; Lasaponara *et al.*, 2014; Chase, Chase y Chase, 2017).

En este sentido, algunos autores han manifestado cierto escepticismo sobre el uso de ciertas técnicas prospectivas aplicadas a la arqueología subacuática en cuevas. Por ejemplo, la tendencia al exceso de medios prospectivos y la falta de idoneidad de algunos de los medios utilizados en la prospección arqueológica subacuática. En gran parte de los estudios de impacto ambiental, que requieren una prospección arqueológica previa, se ha observado que los resultados obtenidos son a menudo poco precisos para un gran número de yacimientos, precisamente los más habituales y accesibles, como los ubicados en mar abierto a poca profundidad y sin corriente de fondo, por lo que el sondeo manual o mecánico sigue siendo un método muy fiable (Nieto, 1984, 2009). Otros autores, plantean que en los últimos años se ha evolucionado y profundizado bastante en el desarrollo de una metodología de prospección más precisa. Para ellos, es básico diferenciar dos momentos de actuación: el primero, el trabajo previo de gabinete, el que permita realizar una acertada planificación de la posterior salida al campo y, el segundo, el momento de llevar a cabo la prospección propiamente dicha, contando para ello con un equipo correctamente preparado (Morales, 2000).

Por último, cuando nos referimos de manera específica al estudio arqueológico de un sistema cárstico inundado (Fernández y Baquero, 2006), la metodología más idónea de la que disponemos hoy día para desarrollar el primer nivel de análisis, entendido como la detección, localización y captación de la información básica de la actividad antrópica, es la prospección sistemática visual superficial. Actualmente, las técnicas empleadas están vinculadas con el concepto de prospección sistemática superficial intensiva con, o sin, recogida de material (dependiendo de los objetivos y autorizaciones del proyecto de investigación), en sus modalidades tanto pavimentaría (superficies y formas del piso de la cavidad) como parietal (superficies y formas de las paredes y techos de la cueva (Sanchidrián, 2017).

### 1.3. HACIA UN NUEVO CONCEPTO METODOLÓGICO DE PROSPECCIÓN

Aunque los inicios de la arqueología subacuática en España se remontan al año 1894, cuando se llevó a cabo una actuación arqueológica submarina en Cala Cativa (El Port de la Selva), la cual es considerada la primera que se realizó con criterios y objetivos arqueológicos (Raurich i Santaló, 1994) no es hasta la década de los 80 del pasado siglo cuando empieza a generalizarse el estudio científico riguroso de los yacimientos arqueológicos subacuáticos, donde la prospección y la excavación fueron elementos esenciales en el conocimiento de nuestro pasado sumergido (Martín y Cobo, 2006). Es por esto que, entre todas las definiciones sobre prospección arqueológica subacuática, creemos que las definidas por Carlos de Juan (De Juan, 2009) y Carlos León Amores (León, 2003) son las más próximas y ajustadas. León Amores describe la prospección como el conjunto de trabajos encaminados al estudio de una zona geográfica amplia con el fin de localizar el mayor número posible de sitios arqueológicos mediante un reconocimiento superficial, realizando una clasificación cultural y evaluando su estado de conservación. Además, en su artículo describe la importancia de recopilar información a través de la documentación y el estudio de las fuentes históricas, cartográficas, toponímicas y arqueológicas del terreno a prospectar como método de contextualización previo a los trabajos de inmersión.

Pero sin duda, lo más significativo del artículo de León Amores es el concepto de metodología prospectiva que la define como la “*inspección del terreno mediante la prospección ocular con buceadores*”, y donde especifica que entre los objetivos están: obtener la coordenada de situación, su distancia a la costa, su profundidad, el tipo de fondo, el tipo de objeto arqueológico y la coincidencia entre las fuentes de información (León, 2003).

Evidentemente este tipo de metodología no está exenta de una problemática variada y así lo hacía constar de nuevo Xavier Nieto (2009), aunque su trabajo trata sobre la excavación arqueológica, creemos que es completamente extrapolable a la prospección. Nieto (2009) explica por qué no existe una metodología estandarizada en el trabajo subacuático, puesto que es responsabilidad de la persona responsable disponer de la mejor metodología

posible, entendiendo el método científico en su concepción más etimológica: como camino hacia el conocimiento fiable. Nieto (2009) aclara que la metodología elegida, tendrá que cumplir unas condiciones mínimas para dar respuesta efectiva a la problemática técnica que presenta el medio acuático, siendo necesario que ésta sea clara en su exposición, rápida en su ejecución, puesto que el tiempo de permanencia bajo el agua es limitado, y sencilla en su actuación. Para ello el cumplimiento de esta regla requiere de una programación previa exhaustiva que debe prever cualquier contingencia, problema o imprevisto que pueda ser solucionada en las mejores condiciones posibles (Nieto, 2009).

Todos los métodos de trabajo y las técnicas descritas en los artículos anteriores han sido aplicados en la arqueología subacuática en general y podrían ser perfectamente extrapolados y empleados en la prospección en cavidades sumergidas si no fuera porque la dificultad técnica es mayor (Huber, 2009, 2014). Como iremos repitiendo y esgrimiendo a medida que avancemos en la exposición del presente trabajo, la prospección en cuevas sumergidas debe seguir una metodología distinta, aunque tiene una relación directa con la prospección arqueológica subacuática en aguas abiertas.

Uno de los principales trabajos de investigación que se ha centrado en mejorar y describir la metodología prospectiva en cuevas sumergidas es el artículo de Huber (2014) *“Tauchgang in die Totenwelt: Prospektions- und Dokumentationsmethoden zur archäologischen Erforschung gefluteter Höhlensysteme auf der Halbinsel Yucatán, Mexiko”*. En él se describe la necesidad de que el responsable del equipo debe supervisar la inmersión prospectiva y mantenerse constantemente en las inmediaciones de la línea principal, que sirve como guía en el sistema de cuevas, mientras que los miembros restantes del equipo prospectan a ambos lados de la línea y se comunican a través de señales de luz. De este modo, si encuentran un hallazgo potencial, un miembro del equipo realiza un “salto” o avance desde la línea principal al área de trabajo. Para ello se debe lanzar una línea secundaria desde la línea principal, usando una flecha direccional que apuntará hacia la salida de la cavidad. El responsable del equipo permanecerá en el salto y servirá como buzo de referencia y de apoyo para el resto de los miembros del equipo. Esto permitirá llevar a cabo una primera evaluación y clasificación del sitio arqueológico a estudio para documentarlo en

inmersiones posteriores. Dependiendo de la estructura, extensión y tamaño de la cavidad, solo se podrá prospectar las áreas principales mientras que las secciones más pequeñas deberán ser ignoradas debido a limitaciones de tiempo siendo fundamental conseguir un equilibrio entre esfuerzo, tiempo y éxito probable (Huber, 2014).

Pero, sin embargo, tras la lectura de estos autores, algunas de las preguntas que nos surgen son ¿Dónde debemos prospectar en una cueva? ¿es viable hacerlo?, ¿son todas las cuevas iguales? y ¿podemos estandarizar las respuestas metodológicas? Para responder estas preguntas debemos introducirnos de nuevo en la obra de Campbell (2016) o en la de Flemming (2020). En la segunda en especial, podemos ver como Flemming (2020) ha prospectado sin éxito muchas cuevas alrededor del mundo y sus conclusiones son útiles para los planteamientos iniciales de una prospección en cuevas sumergidas; I) Las grandes cuevas sumergidas litorales con entradas anchas suelen estar erosionadas por las olas. Estas entradas quedan desprovistas del sedimento original por el proceso de inundación y oleaje durante muchos metros hacia el interior de la cavidad. En estos contextos, los restos arqueológicos solo se conserven si están enterrados bajo grandes bloques procedentes del colapso del techo y de las paredes de las cavidades o bien si están cimentados o concrecionados, II) las cuevas con múltiples cámaras contiguas, canales cársticos o galerías de disolución<sup>1</sup> son los que más probablemente conserven indicadores antropogénicos o indicadores terrestres y restos paleontológicos, III) las cuevas cársticas sumergidas generalmente conservan espeleotemas, los cuales son útiles para reconstruir cambios del paleoclima y oscilaciones del nivel del mar (Flemming y Antonioli, 2017; Flemming, 2020). Flemming (2020) también aconseja realizar un estudio previo mediante un catálogo sistemático de cuevas marinas sumergidas utilizando datos procedentes de otras especialidades (espeleología, biología, arqueología, etc.), correlacionar la topografía de las cavidades sumergidas con la distribución de cuevas cercanas en tierra, y especialmente con aquellas en tierra, en las que se sabe que contienen restos de ocupación. También considera oportuno crear un

---

<sup>1</sup> La disolución cárstica se debe un proceso químico por el cual el dióxido de carbono de ciertas aguas más ácidas (como la que proviene del deshielo) interactúa con la roca caliza creando bicarbonato cálcico, que es altamente soluble.

modelo de inundación<sup>2</sup> erosiva de los depósitos estratificados<sup>3</sup> para conocer la probabilidad de que se conserven restos arqueológicos en el interior de las cavidades o estudiar la densidad de los sitios de cuevas terrestres ocupadas en las cercanías de un área de investigación submarina, para así evaluar el porcentaje probable o posible de cuevas que podrían haber estado habitadas (Flemming y Antonioli, 2016; Campbell, 2018; Flemming, 2020).

---

<sup>2</sup> Permiten modelizar dominios de flujo muy diversos, ya que posibilita incorporar al modelo ambientes complejos, como ríos con marcadas variaciones de velocidad o con flujos transversales. Son especialmente útiles para el cálculo de llanuras de inundación y para analizar flujos con características laminares.

<sup>3</sup> La estratigrafía arqueológica es el estudio de la superposición de capas o estratos de la tierra en el terreno con una finalidad arqueológica. Cada capa tiene una edad diferente, y según donde encontremos un objeto podemos establecer su antigüedad.



## CAPÍTULO 2

# OBJETIVOS GENERALES DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN

*El agua fresca y fría de muchas cuevas submarinas ofrece un entorno protector para los artefactos orgánicos ya que, generalmente, el 75-90% de los artefactos encontrados en sitios húmedos en todo el mundo están compuestos de materiales orgánicos.*

*John M. Coles (Coles, 2018)*

## **2. OBJETIVOS GENERALES DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN**

El objetivo de la presente tesis denominada “Técnicas y Metodologías de Prospección en Cuevas Sumergidas” ha tenido como propósito fundamental la confrontación de una serie de metodologías arqueológicas aplicadas a la prospección subacuática en cuevas sumergidas, extrayendo una serie de conclusiones relevantes sobre que técnicas específicas respondían mejor a cada caso de estudio, resolviendo preguntas concretas sobre qué tipo de prospección era la más efectiva y formulando propuestas concretas sobre como generar un protocolo firme de trabajo en ambientes confinados donde la seguridad y la prevención del medio ambiente fueran elementos fundamentales. Para ello, es cierto que, previamente debíamos conocer la metodología utilizada por los diferentes equipos científicos de investigación en materia de prospección, geolocalización y documentación de los yacimientos arqueológicos encontrados en el interior de cuevas sumergidas para así cotejar y averiguar que técnicas utilizadas por ellos era la más efectiva para nuestro estudio, aunque la información al respecto era escasa.

Así, el objetivo del presente trabajo pretendía generar una serie de proyectos arqueológicos donde se aplicarían una serie de técnicas y metodologías científicas mejoradas, sobre todo en lo que respecta a la prospección arqueológica visual y al geoposicionamiento topográfico real.

Esta metodología de trabajo engloba diversas fases como; la prospección arqueológica visual, la aplicación de la trigonometría, la radiolocalización, los levantamientos topográficos, el geoposicionamiento GPS, la documentación, el registro e inventario de las piezas arqueológicas encontradas y, finalmente, de modo complementario, el empleo de la arqueometría. Este tipo de estudio arqueológico aplicado a la mejora de las técnicas de prospección deberá ir siempre ligado a un estudio previo y complementario de la cueva, que confirme la posible viabilidad de la prospección y la generación de un proyecto arqueológico, tema importante que se desarrollará exhaustivamente tanto a nivel teórico como práctico como herramienta fundamental de desarrollo de cualquier tipo de prospección arqueológica científica. Para ello, se proponen una serie de métodos de trabajo directos e indirectos que desarrollarán dos tipos distintos de

prospección arqueológica, entiéndase siempre ésta en su más amplia definición del término, puesto que irá desde el trabajo clásico de campo hasta el trabajo analítico de laboratorio.

De este modo, las dos fases necesarias para completar una prospección arqueológica completa, y que defenderemos en esta tesis serán; una primera fase donde se llevará a cabo una prospección arqueológica subacuática visual y topográfica, entendida ésta como la fase metodológica capaz de geo posicionar correctamente un yacimiento sumergido respecto a un plano geográfico y, una segunda fase, que denominaremos de prospección arqueológica subacuática documental, entendida ésta como la utilización de técnicas de registro y documentación in situ.

Todas estas fases mencionadas debían ser contextualizadas previamente por un trabajo historiográfico, cartográfico y arqueológico y completadas por una contextualización del terreno y del paisaje (Criado, 1999; Picornell, 2012; García, 2014).

En nuestro caso, al margen de algunos artículos muy concretos donde se explicaba muy brevemente, y sin entrar en detalles, las técnicas utilizadas en el registro arqueológico del yacimiento, nuestro estudio ha tomado como base y punto de partida tres obras muy importantes sobre arqueología subacuática en cuevas sumergidas, como son:

- El libro *“The Archaeology of Underwater Caves”*, editada por el arqueólogo Peter B. Campbell en 2018.
- La tesis doctoral del Dr. Florian Huber Wilhem *“Unterwasserarchäologische, nicht-invasive Prospektionsund Dokumentationsverfahren in schwierigen maritimen und limnischen Gewässern” “Mit Fallbeispielen der Ostholsteinischen Seenplatte, der Halbinsel Yucatán/Mexiko und der Kieler Bucht”* (Arqueología subacuática, prospección no invasiva y trámites de documentación en vías marítimas difíciles y aguas límnicas. Con estudios de casos concretos en el Distrito de los Lagos de East Holstein, la península de Yucatán (México) y la Bahía de Kiel, defendida y publicada el año 2014.

- La tesis doctoral del Dr. Francesc Gràcia Lladó, “*Les Cavitats Subaquàtiques de les Zones Costaneres del Llevant i Migjorn de Mallorca*”, defendida y publicada en 2015.

La finalidad del presente trabajo era poner en conocimiento y valor los sistemas cársticos inundados, proteger posibles yacimientos arqueológicos, dar un empuje metodológico a la arqueología subacuática en cuevas sumergidas y semi-sumergidas y eliminar métodos obsoletos o caducos. Además, se han difundido los conocimientos adquiridos, durante los casi siete años de duración de esta investigación, mediante la publicación de artículos en diversas revistas científicas indexadas (Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a, 2022b; Fumás *et al.*, 2022) y se ha creado un protocolo riguroso de actuación. Este protocolo va desde la planificación previa del proyecto prospectivo, pasando por la elección adecuada de la metodología de trabajo, utensilios y dispositivos adecuados en cada caso, hasta la generación de un mecanismo de difusión adecuado que sensibilice a las autoridades pertinentes y al público en general sobre la importancia y fragilidad de los yacimientos arqueológicos en las cuevas sumergidas.

Para ello, debemos volver de nuevo a recordar las dos fases necesarias para completar una prospección arqueológica completa; la prospección arqueológica subacuática visual y topográfica, entendida ésta como la fase metodológica capaz de geo posicionar correctamente un yacimiento sumergido respecto a un plano geográfico y la prospección arqueológica subacuática documental, entendida ésta como la utilización de técnicas de registro y documentación in situ que permita una contextualización completa del yacimiento.

Durante este trabajo explicaremos las diferentes técnicas de registro arqueológico utilizada en los diferentes tipos de cueva y los distintos métodos empleados, diferenciando entre lo que denominamos directos e indirectos, siendo los primeros los que se utilizan en el propio ambiente confinado para la topografía, la documentación y para el registro arqueológico in situ, mientras que los indirectos son aquellos que son utilizados externamente y que tienen como una función arqueo-métrica de generación de datos adicionales mediante el análisis

complementario de las muestras recogidas tanto de agua como de sedimento (Rocha *et al.*, 2014; Campbell, 2017).

Uno de los principales objetivos de la presente tesis, y que se ha ido reforzando a medida que han ido transcurriendo los ensayos y los proyectos arqueológicos, que definiremos a continuación, es el registro topográfico subacuático como una herramienta fundamental para el conocimiento real de la ubicación de un yacimiento arqueológico en el interior o exterior de una cavidad sumergida. Sin duda, es donde más esfuerzo y desempeño se ha realizado estos años debido a la necesidad de conocer qué método era el más riguroso y real en la toma de datos y coordenadas en un ambiente confinado. El objetivo fue alcanzado con éxito en los trabajos de prospección realizados en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou en el Proyecto IASCM del año 2020 en la isla de Mallorca (Fumás, 2022b).



## CAPÍTULO 3

# ESTADO DE LA CUESTIÓN

*La arqueología de las cuevas submarinas no es simplemente arqueología de buceo, sino el estudio de la interacción humana con el agua.*

*Peter B. Campbell (Campbell, 2017).*

### 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En la península ibérica, la arqueológica subacuática dispone de una larga tradición desde finales de siglo XIX, con una gran cantidad de yacimientos excavados en los últimos años, aunque en su mayoría éstos se encuentran en mar abierto y en zonas relativamente cercanas a la costa (Vivar, Geli y Nieto, 2013; Sáez, 2016; de Juan *et al.*, 2017; Crespo y San Claudio, 2020). En cambio, en el caso de los yacimientos prehistóricos sumergidos, tan solo se trabaja en el yacimiento del poblado lacustre de la Draga, en la localidad catalana de Banyoles (Bosch, Chinchilla y Tarrús, 2011; Palomo *et al.*, 2014) y en la localización y prospección de posibles cuevas sumergidas en la plataforma continental cántabra, en el denominado Proyecto PaleoSub<sup>4</sup> (Arias, 2020), el cual trata de desarrollar una metodología adecuada y precisa para este tipo de contextos.

El conocimiento del litoral sumergido ha sido también una prioridad por parte de la Comisión Europea, por ello en el año 2009 se creó la red de investigación SPLASCOS<sup>5</sup> (Sumerged Prehistoric Landscape and Archaeology of Continental Shelf) bajo el programa COST (Cooperation in Science and Technology), que funcionó desde 2009 hasta 2013, y donde se reunieron más de 100 especialistas de todo el mundo en distintos ámbitos, que iban desde la geofísica, las ciencias ambientales, la arqueología subacuática o el patrimonio cultural<sup>6</sup>. El objetivo del proyecto fue estudiar el patrimonio prehistórico subacuático y darlo a conocer al público en general<sup>7</sup>.

En el caso de la arqueología subacuática en cuevas sumergidas en la península ibérica, la escasez de ejemplos hace que no se disponga de un corpus metodológico tan desarrollado. En realidad, las investigaciones más detalladas y rigurosas en esta materia, a nivel estatal, han sido realizadas desde principios de los años 90 por Francesc Gràcia en Mallorca. Gracias a los centenares de

---

<sup>4</sup> <https://scope.unican.es/paleosub>

<sup>5</sup> [https://www.splashcos.org/sites/splashcos.org/files/downloads/TD0902%20Final%20Evaluation%20Report\\_Official%2BAll\\_Appendices.pdf](https://www.splashcos.org/sites/splashcos.org/files/downloads/TD0902%20Final%20Evaluation%20Report_Official%2BAll_Appendices.pdf)

<sup>6</sup> <https://www.splashcos.org/>

<sup>7</sup> <http://splashcos-viewer.eu/>

inmersiones realizadas tanto por él como por el equipo del Grup Nord Mallorca (GNM), actualmente denominada como Societat Espeleològica Balear<sup>8</sup> (SEB), se ha conseguido aumentar el conocimiento arqueológico de las cavidades cársticas mallorquinas (Gràcia, 2015).

### 3.1. LA PROBLEMÁTICA GLOBAL EN LA ARQUEOLOGÍA SUBACUÁTICA EN CAVIDADES CÁRSTICAS SUMERGIDAS

Desde hace tres décadas los problemas de geolocalización y topografía de las cuevas terrestres han encontrado soluciones técnicas en el medio aéreo con la aparición de los sistemas LIDAR (*Light Detection And Ranging*) (Moyes y Montgomery, 2016) y los escáneres laser<sup>9</sup> (Chase, Chase y Chase, 2017). Estas soluciones técnicas, que permiten hoy la realización de clones digitales de cuevas, han dejado de lado las cuevas sumergidas debido a los inconvenientes que presenta el medio acuático para su uso. Por otra parte, la historiografía sobre la metodología arqueológica en ambientes subterráneos y concretamente en cavidades sumergidas es escasa y discontinua en el tiempo, en especial durante las últimas décadas, momento el en que se han producido pocos avances en esta materia.

Todos los estudios sobre prospección arqueológica en cavidades sumergidas coinciden en que los materiales antropogénicos son más difíciles de encontrar en la entrada de las cuevas, debido a la erosión del suelo producida por la fuerza del mar o por el desprendimiento de rocas en la entrada de éstas (Campbell, 2017). Además, cualquier tipo de prospección o excavación en su interior se hace extremadamente difícil en su ejecución, debido a la fina capa de limo superficial que, en contacto directo con el propio buzo o con el material que porta, crea una niebla de partículas en suspensión que provoca la visibilidad cero (Fumás, 2022a). Por ello, en el caso de la arqueología subacuática en cavidades sumergidas, se debe hacer una pequeña reflexión sobre la diversidad de registros, según nos

---

<sup>8</sup> <http://socespbal.blogspot.com/>

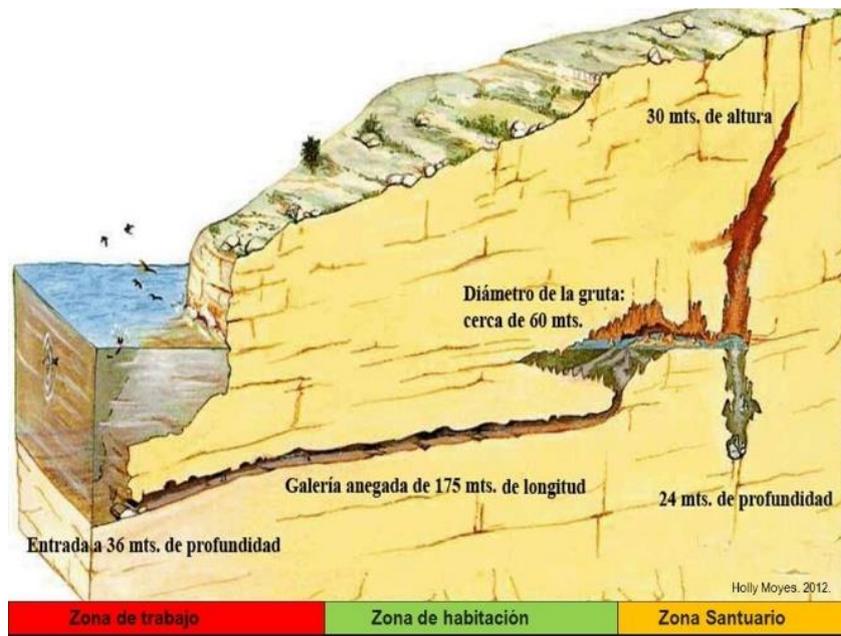
<sup>9</sup> <https://www.globalmediterranea.es/el-uso-de-escaner-laser-y-fotogrametria/>

refiramos a cavidades subacuáticas litorales e interiores, normalmente de agua dulce o salobre; o cavidades submarinas, en las que el aumento del nivel del mar, producido a finales del Pleistoceno, las inundó, cambiando su dinámica geológica de forma permanente (Gràcia, 2015).

En general, en el estudio arqueológico de las cavidades sumergidas bajo el mar, se sabe que los indicios humanos son mucho más fáciles de conservar, cuanto más alejados se encuentran de la entrada de la cavidad y cuanto más protegidos se encuentran dentro de ésta (Flemming y Antonioli, 2016). Muchas veces este material se encuentra mimetizado, incrustado, cementado o concrecionado en forma de brechas carbonatadas, lo cual dificulta mucho su localización y su excavación. Estos hándicaps muestran el porqué de la escasa investigación en este campo desde los primeros estudios llevados a cabo en los años 60 (Campbell, 2017).

De igual manera y a modo de contextualización, se deben recordar los estudios realizados por Holly Moyes en los que se concluye la importancia de la divisoria en tres partes distintas del uso de las cuevas por parte de los habitantes prehistóricos mesoamericanos. Concretamente Moyes centró su estudio en las cuevas habitadas por mayas, olmecas y aztecas con una cronología desde la cultura preclásica (2000 a.C.), hasta la clásica tardía (600 al 900 d.C.) (Moyes y Brady, 2012). Moyes analizó tres partes diferenciadas; I) una parte exterior a plena luz, en la que se ubicaría el área de despiece de animales y trabajos líticos diarios, II) hacia el interior, determinó una zona interna semiiluminada dentro de la cueva, pero no lejos de la entrada, la cual serviría como hogar y habitación y III) una zona oscura y lejana a la entrada de la cavidad, en la que la espiritualidad, la religiosidad y la devoción darían lugar a pinturas y esculturas en busto redondo, donde sus habitantes la utilizarían como santuario (Moyes y Brady, 2012) (Fig. 1).

En general, aunque la funcionalidad de las cuevas y abrigos es muy amplia a lo largo del tiempo, los usos de hábitat o domésticos, de almacenamiento y protección del ganado, o el simbólico-religioso son compartidos por muchas sociedades del pasado (González, 2002; Sauer, 2011; Moyes, 2012).



**Figura 1.** Adaptación de una imagen de un corte transversal de la montaña que alberga la cueva Cosquer en Marsella (Francia) con las tres zonas de usos diferenciados por Moyes. Fuente: (Moyes y Brady, 2012).

Por eso, es fácil que, de forma evidente, nos venga a la memoria el extraordinario hallazgo en la Grotte Cosquer, con sus pinturas murales del Paleolítico Superior, a casi 200 metros de la entrada de la cueva, la cual estaba sumergida a casi cuarenta metros de profundidad en la zona de las Callanques en Marsella (Clottes *et al.*, 1992; Collina-Girard, 1995; Billaud *et al.*, 2014) (Fig. 1).

Las cuevas submarinas han sido una fuente de descubrimientos sensacionales y tienen un gran potencial de futuro, como lo demuestran los hallazgos arqueológicos paradigmáticos como; los manantiales de Florida (Flemming y Antonioli, 2017), los cenotes de la península del Yucatán (México) (Andrews, 1960; De Anda, 2003; Huber, 2009; García, 2014; Rissolo *et al.*, 2015; Martos, 2018; Barba Meinecke, 2020; Barba-Meinecke, Pizá Chavez y Quetz León, 2022), la cueva Cosquer en Francia (Billaud *et al.*, 2014) o la cueva de la Font de Ses Aiguades en Mallorca (Gràcia *et al.*, 2001) .

### 3.2. TIPOS DE PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA SEGÚN EL TIPO DE DEPOSITO

En el caso de la arqueología subacuática en cuevas es importante tener en consideración si la presencia de restos arqueológicos y el uso de la cavidad tiene, o no, relación con el hecho que la cavidad se encuentre inundada (Moyes, 2012), puesto que algunos autores han propuesto que la funcionalidad puede agruparse en dos grupos; cuevas refugio y cuevas santuario (González, 2002).

En nuestro caso, debemos considerar la existencia de dos tipos de depósito en cuevas subacuáticas: directo e indirecto (Campbell, 2017). El primero se relaciona con cuevas que en el pasado estuvieron secas y posteriormente quedaron sumergidas, lo cual nos indica que pudieron servir de hábitat, mientras que el segundo son a menudo sitios rituales o de aprovechamiento de aguas freáticas. Así, cuevas en cenotes como las de Hoyo Negro (Rissolo *et al.*, 2015) o Holtún (García, 2014), o cuevas litorales como la de Cosquer (Clottes *et al.*, 1992) son ejemplos de depósito directo, mientras que cuevas como la de Han-sur-Lesse (Warmenbol, 2004) y la cova de la Font de Ses Aiguades (Colom y Járrega, 2020) son ejemplos de depósito indirecto.

Por un lado, las cavidades con depósito directo son sitios con posibles restos arqueológicos, ya que en su interior se realizaron actividades antrópicas cinegéticas, de vivienda o de subsistencia, aunque también pudieron ser partícipes de actividades religiosas y rituales. Por esta razón, la prospección en estas cavernas tiene que centrarse en el estudio estratigráfico, al igual que ocurriría con las cuevas terrestres ya que es probable que los sitios de habitación estuvieran ubicados cerca de la entrada, mientras que la evidencia de minería, caza o rituales podría requerir inmersiones de penetración importante (Moyes, 2012).

Por otro lado, las cuevas con depósito indirecto que han permanecido siempre inundadas están relacionadas con un depósito remoto, a través de objetos arrojados desde la superficie a modo de ofrenda, quedando sumergidos desde ese momento. Esto puede generar una distinción general, ya que los depósitos en aguas poco profundas pueden colocarse de modo intencional, como es el caso de la estructura ciclópea sumergida de la cova Genovesa (Gràcia *et al.*, 2003) o, por

el contrario, los restos sumergidos podrían ser arrojados o perdidos de manera completamente arbitraria, como en el caso de la cova de la Font de Ses Aiguades (Gràcia *et al.*, 2001) o de Han-sur-Lesse (Warmenbol, 2004), ya fuera por razones de abastecimiento de agua o como prácticas rituales o actividades de subsistencia.

### 3.3. PRESENTE DE LA INVESTIGACIÓN PROSPECTIVA EN CUEVAS SUMERGIDAS

Actualmente, existe un pequeño avance en la evolución metodológica de la arqueología subacuática en cavidades sumergidas, con una serie de artículos publicados sobre los yacimientos arqueológicos encontrados en el interior de las galerías sumergidas de las cuevas. Los trabajos se han centrado, sobre todo, en documentar y describir los restos arqueológicos del propio yacimiento. Sin embargo, hay una falta de información en la explicación de la ejecución de esos trabajos de prospección previos al hallazgo, sobre la metodología usada, y sobre cómo se ha conseguido la geolocalización y la ubicación espacial (Huber, 2009; García, 2014; Arroyo-Cabrales *et al.*, 2015; Rissolo *et al.*, 2015; Campbell, 2017; Barba Meinecke, 2020; Barba-Meinecke, Pizá Chavez y Quetz León, 2022). En su gran mayoría los artículos publicados parten de topografías previas realizadas por espeleo-buceadores deportivos usando como único método el cálculo de las poligonales de las galerías sumergidas respecto al hilo guía, lo cual es una fuente de importantes errores, sobre todo cuando las estas galerías alcanzan centenares o miles de metros (García, 2014).

Hasta hace poco tiempo encontrar la ubicación exacta, dentro de una cavidad sumergida con poca o nula visibilidad, en un área de intervención concreta, era una tarea compleja que requería repetir la inmersión del buzo que había trabajado previamente en esa ubicación. Actualmente, gracias a las nuevas consolas de navegación, como la del ENC3 de SEACRAFT<sup>10</sup>, si somos conocedores de las coordenadas exactas del área de interés, podemos compartir la información con otros espeleo-buceadores, lo que garantiza la continuidad de los trabajos de prospección sin la necesidad de contar con los buceadores primigenios de la

---

<sup>10</sup> <https://seacraft.eu/products/navigation-console/enc3/#full-set-dedicated-to-seacraft-scooters>

exploración. Esto resulta muy útil si nuestra área de trabajo se encuentra muy alejada de la boca de la cueva submarina, debido a la dificultad para encontrar su ubicación exacta, sobre todo si las dimensiones de la cavidad son importantes o si la zona en concreto está alejada de la línea guía (Gilli, 2021).

Actualmente, apenas existen referencias bibliográficas en revistas indexadas sobre la metodología de uso de estos dispositivos, aunque éstos están muy generalizados entre los proyectos de investigación espeleológica más avanzados<sup>11</sup> debido a su facilidad de uso y a la exactitud de sus lecturas comprobadas por medios complementarias como pueden ser las radiobalizas de geoposicionamiento (Leandro Ronda *et al.*, 2021).

### 3.4. LA IMPORTANCIA DE LA GEORREFERENCIACIÓN TOPOGRÁFICA EN LA PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA

La georreferenciación en arqueología permite conocer la ubicación de un determinado yacimiento sobre el espacio de manera unívoca, es decir, dotarle de una localización única definida por una serie de puntos con coordenadas conocidas, en un sistema de referencia y en una proyección cartográfica. La importancia de la georreferenciación aplicada al estudio de yacimientos en cavidades sumergidas va desde la obtención de resultados sobre su contexto espacial, ya sea local o global, pasando por la comparación de cartografías o datos espaciales de diferentes edades, hasta llegar a proporcionar una plusvalía en lo relativo a la seguridad ligada a la campaña subacuática de campo. Los resultados obtenidos nos proporcionan una ubicación espacial factible de ser utilizada no solo en arqueología sino también en el espeleo-socorro de buceadores en posibles rescates en cuevas, gracias al replanteo de puntos en superficie (Davila y Camacho, 2012).

En términos generales, se entiende por levantamiento topográfico al conjunto de técnicas y metodologías capaces de documentar información espacial y geométrica del terreno o de diferentes sucesos sobre él, para obtener, teniendo en

---

<sup>11</sup> <https://xplorasub.wixsite.com/xseng>

cuenta una tolerancia preestablecida, su representación gráfica. Es decir, teniendo en cuenta un rango de error permitido, el levantamiento topográfico es, el paso de la realidad física del terreno al papel o mapa, una información geométrica esencial para poder entender y contextualizar los restos encontrados en el yacimiento (Pachas, 2009). Esta tolerancia o error máximo permitido dependerá de las metodologías de observación y de los instrumentos utilizados y nos proporciona un orden de rigurosidad en la documentación geométrica del yacimiento. La metodología de campo y la instrumentación utilizada, conforme a esa tolerancia preestablecida, condiciona directamente la viabilidad económica del proyecto arqueológico debido, a que usar un procedimiento u otro, puede encarecer tanto la expedición, que la haga inviable. Es por ello por lo que previo a la campaña de campo se ha de realizar un estudio de recursos económicos y medios materiales que definan nuestra tolerancia geométrica la cual condicionará la disposición de recursos (Fernández Gómez, 2008).

Obtener unos datos espaciales rigurosos de cada uno de los restos arqueológicos encontrados en el yacimiento se hace necesario no solo con la finalidad de obtener una documentación espacial fiable, sino, también para poder detectar posibles expolios, contextualizar conjuntamente cada uno de los restos encontrados y para poder replantear con posterioridad la ubicación de cada uno esos restos arqueológicos. Desde la aparición de las técnicas fotogramétricas o las técnicas LIDAR y láser escáner subacuáticos, la documentación geométrica de yacimientos de cuevas sumergidas ha experimentado una mejora en la rigurosidad y definición espacial de los yacimientos. Gracias a estos métodos e instrumentos es posible realizar una documentación tridimensional georreferenciada de los yacimientos arqueológicos sumergidos y de su entorno con precisiones milimétricas a nivel local y decimétricas a nivel global. El principal inconveniente, que ha de ser planteado desde la fase de planificación, es el elevado coste y el alto grado de especialización técnica del equipo y material que requiere la utilización de estos métodos e instrumentaciones. Por ello, el planear una documentación geométrica del yacimiento poco coherente con los recursos disponibles pueden hacer inviable el proyecto arqueológico (Fumás, 2022b).

### 3.5. VISIÓN HISTORIOGRÁFICA DE LA ARQUEOLOGÍA EN CUEVAS CÁRSTICAS SUMERGIDAS

La identificación cronológica de los comienzos de la investigación arqueológica en cuevas sumergidas es larga y discontinua y ha sido analizada por diversos autores durante los últimos años. Sin duda, la recopilación llevada a cabo por Peter B. Campbell es su libro “*The Archaeology of Underwater Caves*” (Campbell, 2016), es un claro ejemplo de ello, el cual describe de una manera clara y breve las distintas etapas en la investigación de este tipo de cavidades sumergidas.

En muchas ocasiones, analizando la historiografía respecto a los inicios de la investigación arqueológica en cavidades sumergidas, se confunde o se mezcla con la arqueología subacuática. En las siguientes líneas nos hemos dispuesto a describir una breve y concisa cronología sobre los inicios de la investigación arqueológica centrándonos solo en cuevas inundadas puesto que salirnos de este guion implicaría una redacción mucho más extensa sobre la arqueología subacuática y sus inicios.

Campbell en su obra (Campbell, 2016, 2017), nos data el año 1593 como la fecha en que se produjo la primera investigación sistemática de un conjunto de artefactos en el interior de un manantial, cuando Helisäus Rößlin realizó un registro meticuloso de las monedas romanas encontradas en el manantial de Niederbronn-les-Bains, Francia (Sauer, 2011). Posteriormente, en 1606 se encontraron restos romanos en la Grotta Azzurra, o Gruta Azul, en la isla italiana de Capri, los cuales fueron explorados y registrados documentalmente antes de ser redescubiertos en 1826 (La Russa *et al.*, 2013).

Desafortunadamente, a lo largo de la historia, la investigación ha sido esporádica y discontinua ya que los hallazgos eran accidentales más que sistemáticos. Se descubrieron muchos restos arqueológicos descontextualizados, a raíz del resultado de la generación de proyectos de construcción como, por ejemplo, el templo de Sulis Minerva en la localidad de Bath (Reino Unido), el cual fue encontrado mientras se cavaba una alcantarilla. La excavación más importante en la cavidad sumergida del manantial de Bath, antes de las operaciones modernas,

tuvo lugar en 1879 bajo el mando del Mayor Charles Davis (Reece, 1989). También en 1852 durante la demolición de los baños en *Aquae Apollinares*, cerca de Vicarello (Italia), se descubrieron alrededor de 5,000 monedas, 34 vasijas de metales preciosos y otras ofrendas votivas en el interior de las termas (Marchi, 1852). Otro caso importante se dio en 1864 en el balneario de Weston (Reino Unido), mientras se excavaba una cantera (Cunliffe, 1971). Allí se hallaron dos cucharas de bronce que datan de la Edad del Hierro y que, probablemente, se depositaron en un ritual. En 1875, durante el drenaje de las aguas termales en Bourbonne-les-Bains (Francia), se encontraron pedernales mesolíticos, estatuillas votivas del período romano y más de 4.500 monedas y artículos personales depositados como votivas (Sauer, 2005).

Pero, realmente, el estudio científico tanto geológico, arqueológico y paleontológico de las cuevas sumergidas comenzó durante el siglo XIX bajo la figura de Édouard Alfred Martel, uno de los pioneros de la espeleología moderna, identificando restos de fauna fósil en Wakulla Springs (Florida, USA), en 1850 (Green, 2016). A mediados del siglo XX, concretamente en 1946, en Wookey Hole (Reino Unido), Ted Mason realizó los primeros descubrimientos en las partes sumergidas de la cavidad, donde se recuperaron 18 cráneos humanos (Hanwell, Price y Witcombe, 2010; Campbell, 2017). También es importante señalar que en 1940, Blanc determinó, después de finalizar su estudio realizado en las Gruta Palinuro (Italia), que las cuevas que actualmente están bajo el nivel del mar podrían haber estado habitadas durante los periodos en el que el nivel del mar era más bajo (Blanc, 1940).

Además, Campbell (2016) en su obra nos revela como se revolucionó el panorama, tras la invención del Aqualung por Émile Gagnan y Jacques Cousteau en 1943, puesto que el auge del buceo recreativo llevó a una mayor exploración de cavidades sumergidas. El primer buceo en cuevas con equipos de buceo autónomos fue llevado a cabo por el equipo de Cousteau en 1946 y fue narrado en su obra *Silent World* publicada en 1954 (Cousteau y Dumas, 1965; Campbell, 2017). Mientras que el primer descubrimiento arqueológico realizado con esta metodología lo realizó Henri Lombard en 1950, cuando encontró cerámica neolítica en el manantial de Avencas (Brissac, Francia) (Gutherz y Coste, 1974; Billaud, 2009) extendiéndose rápidamente este tipo de buceo por todo el mundo.

En 1952, se realizaron las primeras inmersiones con escafandra autónoma en cuevas en los Estados Unidos (Buzzacott *et al.*, 2009). De 1956 a 1966, el Instituto de Investigación de América Central excavó el Cenote Xlakah en Dzibilchaltun (México) (Andrews, 1960). En 1957, Nicholas Flemming comenzó a explorar las cavidades costeras del Mediterráneo en busca de evidencia de cambios en el nivel del mar (Flemming y Antonioli, 2016). A partir de 1957, un equipo arqueológico italiano comenzó a investigar las fuentes termales y el Templo de Apolo y el Plutonium en Hierápolis (Turquía) (Negri y Leucci, 2006). Ya en 1958, William Royal comenzó a explorar los manantiales de Florida (USA) encontrando restos y artefactos humanos del período arcaico y paleoindio (Royal y Clark, 1960). En 1959, se encontraron los primeros artefactos en la cueva Han sur Lesse (Bélgica), lo que dio lugar a un proyecto que se desarrolló desde 1963 hasta el presente (Jasinski, 1965).

A medida que la arqueología subacuática experimentaba su crecimiento, los buzos de cuevas, ya en la década de 1960, continuaron informando de los diferentes hallazgos encontrados con el consiguiente interés por parte de los arqueólogos, sin embargo, las dificultades técnicas no hacían viables muchas de las inmersiones. No fue hasta finales de la década de 1960 y 1970 cuando la arqueología comenzó a investigar exhaustivamente en cavernas sumergidas. De nuevo, Campbell (2018) nos señala como el Museo Público de Milwaukee organizó la excavación del Cenote Azul (México), entre 1966 y 1970 (Andrews y Corletta, 1995), aunque utilizó métodos toscos en las primeras excavaciones subacuáticas. Las excavaciones en Warm Mineral Springs y Little Salt Spring (Florida, USA) fueron iniciadas en primer lugar por el arqueólogo subacuático Carl Clausen, en 1971 y posteriormente, fue Sonny Cockrell quien continuó con las tareas de investigación en 1972 (Clausen, Brooks y Wesolowsky, 1975).

Ya en 1976, Robert Burgess publicó “*The Cave Divers*”, un libro popular que incluía discusiones sobre varios sitios sumergidos (Burgess, 1999) mientras que instituciones nacionales de referencia en la arqueología subacuática como el Instituto Nacional de Antropología e Historia de México<sup>12</sup> (INAH) y el Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines de

---

<sup>12</sup> <https://www.inah.gob.mx/>

Francia<sup>13</sup> (DRASSM) tuvieron la previsión de incluir las cuevas en sus responsabilidades profesionales. De este modo, los hallazgos importantes continuaron después de la década de 1970, como el descubrimiento de Henri Cosquer en 1991 de una cueva cerca de Marsella (Francia) que contiene pinturas paleolíticas (Clottes *et al.*, 1992).

Desafortunadamente, aunque el estudio de las cuevas contribuía en gran medida al conocimiento del buceo y de la arqueología subacuática, su crecimiento fue residual puesto que el interés general se centraba en el conocimiento e investigación de los naufragios. Las cuevas no consiguieron captar la atención ni de la investigación ni de la administración. Como resultado, la investigación arqueológica de las cavidades sumergidas se ha desarrollado de manera intermitente y residual. Los espeleo-buceadores y los científicos de otros campos continúan descubriendo restos arqueológicos y cultura material en el interior de las cuevas sumergidas, pero según Campbell durante las últimas décadas hay pocos trabajos que se involucren en esta temática (Campbell, 2017). Uno de los principales factores es que en el ámbito académico hay muy pocos proyectos y científicos consolidados que ayuden a fortalecer este campo de investigación, lo que obliga a investigar las cuevas junto con otras disciplinas. Actualmente, los espeleo-buceadores recreativos, aún sin ser arqueólogos, han contribuido enormemente al estudio de las cavidades inundadas. De hecho, son la clave para la exploración y el descubrimiento en la mayor parte del mundo. Hoy en día hay muy pocos arqueólogos con un entrenamiento adecuado en espeleobuceo, por lo que la investigación en cuevas submarinas continúa basándose en los descubrimientos y colaboraciones con buzos profesionales y aficionados (Devos, Le Maillot y Riordan, 2005; Al Hamdani *et al.*, 2012; Gregory y Manders, 2015).

Desde estos primeros estudios arqueológicos en cavidades sumergidas, las investigaciones se han centrado fundamentalmente en estudios topográficos, destinados a ubicar los yacimientos en relación con las topografías clásicas realizadas manualmente. Normalmente, este tipo de investigación, no se ha centrado en la implantación de las topográficas de la cavidades sumergidas respecto a la superficie terrestre, hecho que dificulta su estudio arqueológico y la

---

<sup>13</sup> <https://archeologie.culture.fr/fr/drassm>

localización de posibles aberturas desde el exterior (Campbell, 2018). Como hemos mencionado, la mayor parte de las topografías de las cuevas están realizadas por espeleo-buceadores deportivos, utilizando un método topográfico básico, basado en la medición de las poligonales mediante en cálculo de la triangulación de las paredes y del techo respecto al centro de la cavidad o al hilo guía (Vasseur, 2006; Huber, 2009; Al Hamdani *et al.*, 2012). Toda esta información, en ocasiones poco precisa, nos ayuda a conocer de manera preliminar la ubicación geográfica del yacimiento arqueológico sumergido. Sin embargo, los objetivos de los buceadores deportivos y la metodología implementada por éstos distan en gran medida de los intereses arqueológicos, tanto a nivel de objetivos como por las técnicas topográficas utilizadas. A ello, debemos añadir las difíciles características físicas de las cavidades inundadas y las intrínsecas del espeleobuceo como; la percolación, la haloclina, la termoclina, la temperatura del agua, las restricciones de paso y el sedimento en suspensión, las cuales hacen muy difícil la realización de registros arqueológicos precisos (Huber, 2014).

Además, las investigaciones llevadas a cabo por universidades y centros de investigación de todo mundo coinciden en resaltar el gran potencial arqueológico de las cavidades sumergidas, y los distintos trabajos realizados así lo avalan. Algunas de los más importantes se realizaron en la cueva de Stiva en Nusa Penida, Bali, (Indonesia), en la cueva de Little Salt Spring en Florida (USA) (Bonomo *et al.*, 2014), en el cenote Hoyo Negro en la península del Yucatán (México) (Rissolo *et al.*, 2015) o en las cuevas de Taino, en el Parque Nacional del Este (República Dominicana) (Foster *et al.*, 2019). En Europa los casos de estudio más importantes se llevaron a cabo en la Grotte Cosquer en Marsella (Francia) (Clottes *et al.*, 1992), en la cueva de Fontaine de Vaucluse (Francia) (Billaud, 2009) y en la cueva Trou de Han en Han-Sur-Lesse (Bélgica) (Warmenbol, 2004), entre otras. En España los estudios más avanzados en esta materia se han llevado a cabo en la isla de Mallorca, desde la década de los años noventa, dónde se han realizado estudios multidisciplinarios en distintas cavidades cársticas de la isla, hecho que ha permitido también realizar hallazgos arqueológicos dentro de cuevas sumergidas, como el caso de la cova de la Font de Ses Aiguades en Alcúdia (Mallorca) (Gràcia *et al.*, 2001; Colom y Járrega, 2020).

En la actualidad, todos los estudios publicados apenas mencionan las metodologías prospectivas y cuando lo hacen vemos que las técnicas utilizadas presentan una resolución baja, la cual dificulta la ubicación exacta del yacimiento arqueológico en el interior de la cavidad inundada. Afortunadamente, la mejora en las técnicas prospectivas ha aumentado con el uso de nuevos dispositivos electrónicos más avanzados y con la progresión en las técnicas SIG, haciendo posible la geolocalización y el geoposicionamiento del yacimiento tanto en las topografías ya conocidas como en la superficie terrestre. Tan solo algunos proyectos, como los llevados a cabo en los años noventa, en las cuevas sumergidas de las montañas Taurus, en la ciudad de Antalya (Turquía) consiguieron aunar metodologías de mapeo clásico con técnicas SIG, llevando a un nivel muy alto la resolución y creando modelos tridimensionales de las galerías sumergidas de las cuevas (Kincaid, 2000).

Hoy en día, hay diversos proyectos importantes que fluctúan en su continuidad en el tiempo, dependiendo de la financiación con la que cuentan y los objetivos marcados. Los más importantes se llevan a cabo en la península del Yucatán (México) en el área de Tulum, donde se han encontrado vestigios de diversos fósiles humanos de entre los 13.700 a 8.000 años de antigüedad, así como evidencias arqueológicas como útiles líticos, hogueras, depósitos mortuorios y restos de animales con marcas de corte que indican que fueron cocinados y consumidos por humanos en el interior de las cuevas, lo cual habla de los usos y actividades que los primeros habitantes de Tulum. Algunos de estos proyectos son; el “Proyecto Arqueológico de Cenotes y Cuevas de Quintana Roo”<sup>14</sup>, el Proyecto La Mina<sup>15</sup> del Centro Investigador del Sistema Acuífero de Quintana Roo A.C. (CIDAQ), el Proyecto Gran Acuífero Maya (Proyecto GAM)<sup>16</sup>(De Anda, Ortega y Brady, 2019), el Proyecto Tren Maya (Barba Meinecke, 2020) o el Proyecto Arqueológico Subacuático Hoyo Negro<sup>17</sup> (Rissolo *et al.*, 2015) llevado a cabo por la Subdirección de Arqueología Subacuática del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).

---

<sup>14</sup> <https://arqsubmx.weebly.com/blog/cenote-aktun-ha>

<sup>15</sup> <https://es.cindaq.org/copy-of-sagitario-la-mina>

<sup>16</sup> <https://granacuiferomaya.org/proyectos/>

<sup>17</sup><https://www.inah.gob.mx/boletines/6754-proyecto-arqueologico-subacuatico-hoyo-negro-obtiene-importante-premio-en-china>

Hasta la fecha son pocas las localizaciones donde el geoposicionamiento se ha conseguido con éxito, como es el caso de los cenotes. Aquí se suele utilizar un sistema rudimentario manual con una boya y un GPS sostenido manualmente sobre el agua (Kinkella, 2000; Lucero, 2015). Es por eso por lo que el presente estudio ha puesto de manifiesto las ventajas y los inconvenientes de distintas técnicas avanzadas en topografía y prospección subacuática, dando prioridad absoluta a una metodología válida en la geolocalización de los yacimientos arqueológicos sumergidos tanto en la topografía sumergida como en la superficie. Éste, sin duda, es el paso previo para una posterior contextualización e interpretación de los datos obtenidos en el propio yacimiento sumergido.

### **3.5.1. Historiografía de las cavidades sumergidas de la península ibérica con evidencias arqueológicas**

#### *3.5.1.1. Las cuevas sumergidas de Mallorca*

En la década de los 90, en Mallorca las investigaciones arqueológicas más importantes se realizaron fundamentalmente por parte de Francesc Gràcia, espeleólogo y espeleo-buceador del equipo de Grup Nord Mallorca (GNM) quien completó el conocimiento arqueológico previo de las cavidades mallorquinas gracias a las técnicas de espeleobuceo.

Concretamente, ese conocimiento previo venía de publicaciones como “Arqueologia de les cavernes de Mallorca” (Gusó, 1995), el cual fue un volumen editado por la Federació Balear de Espeleologia y la Sociedad de Historia Natural de Baleares. Este trabajo aportó un importante resumen de la historia de las cavidades de interés arqueológico con topografías, tablas de formas de sus principales industrias, descripción de sus construcciones y señales de su uso en épocas prehistóricas. Posteriormente, en 2011 se actualizaron los hallazgos y estudios realizados en los últimos años dentro de las cuevas y se publicó otro monográfico de la revista ENDINS<sup>18</sup> denominado “Arqueologia de les cavernas

---

<sup>18</sup> <https://raco.cat/index.php/Endins>

de las Illes Balears” (Ramis y Santandreu, 2011), en el cual se puso atención al uso de las cavernas durante el Bronce inicial, con especial énfasis a los resultados de los trabajos realizados en la cova Simó y la cova des Riuets. Además, se introdujo el tema de la explotación minera del cobre durante los inicios de la prehistoria mallorquina, a partir de los hallazgos encontrados en los refugios de la sierra de Tramuntana. Por último, y ya en época histórica, se destaca el aprovechamiento de las cuevas como puntos de abastecimiento de agua.

Es por esto por lo que, ya en la tesis doctoral de Gràcia (2015), encontramos un apartado donde detalla los diferentes hallazgos arqueológicos encontrados de finales de los años 90 hasta la actualidad y nos enumera las cavidades donde se encontraron restos cerámicos. Estas cuevas subacuáticas están en la zona oriental de Mallorca (la cova des Coll, la cova del Drac de Cala Santanyí y la cova del Drac de Rafal des Porcs), en la zona occidental (la cova d’es Dolç), en la zona de Levante (la cova Genovesa y la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou) y en el Norte (la cova de la Font de Ses Aiguades). Todos los hallazgos de las piezas arqueológicas que se efectuaron a lo largo de las exploraciones son pruebas que demuestran los diferentes momentos de utilización de las cavidades naturales de Mallorca como lugares para el aprovisionamiento de agua (Gràcia, 2015).

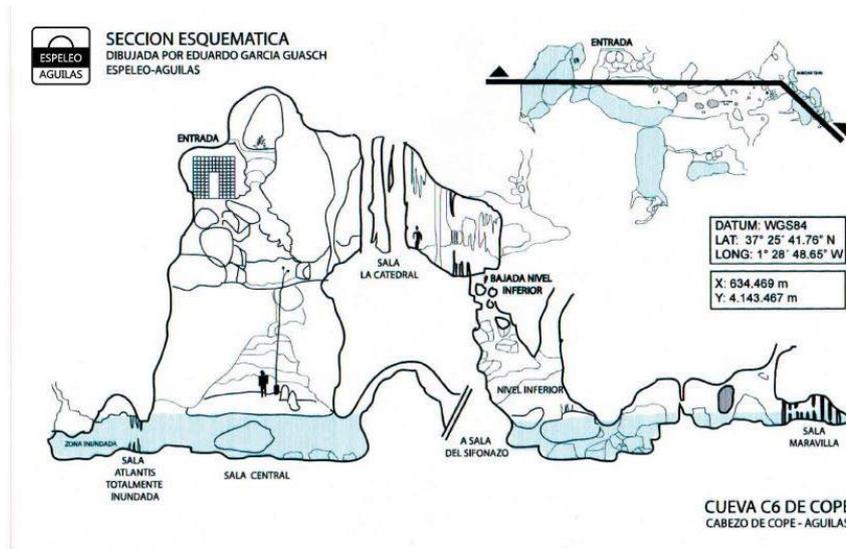
### **3.5.2. Historiografía de las cavidades litorales en la península ibérica con evidencias arqueológicas**

Las intervenciones arqueológicas en zonas litorales en la península ibérica fueron realizadas a finales del siglo XX. Durante los años 80 del siglo pasado se realizaron diferentes investigaciones en cavidades del levante murciano centrados en cuevas semisumergidas de litoral con yacimientos arqueológicos de diferentes cronologías en los cuales se obtuvieron diferentes restos paleontológicos y arqueológicos.

### 3.5.2.1. La cueva C-6

Ciertas cuevas de Murcia, como la C6 en Águilas o la cueva de los Aviones, nos muestran la importancia que tuvieron durante la prehistoria estas cavidades utilizadas como refugio y hábitat habitual (Hoffmann *et al.*, 2018). Las prospecciones subacuáticas llevadas a cabo en la cueva C-6 situada en el Cabo Cope se llevaron a cabo desde el año 1977 por parte del “*Groupe de Recherches et d’Explorations Speleologiques de Seine et Marne*” (GRES) con el patrocinio de la Federación Francesa de Espeleología, encontrando restos cerámicos del Neolítico Tardío (San Nicolás y Martínez, 1987), aunque las medidas de protección y estudio de la cueva fueron finalmente realizadas en el año 1985 por la “Unidad de Arqueología del Servicio Regional de Patrimonio Histórico”.

Aquí aparecieron a 6 metros de profundidad restos humanos, concretamente el coxal y el fémur derecho, además de la tibia y el peroné, todos fuertemente mineralizados y con incrustaciones blancas causadas por algas marinas. Estos datos del desarrollo osteológico indicaron que los huesos pertenecieron a un adulto inmaduro que tendría entre 14 y 22 años. El ángulo cerrado de la escotadura esciática mayor, demostraron que el individuo era varón (Walker, 1987). Esta cavidad guarda similitud con otros yacimientos de Cabo Cope y zonas colindantes como la Marina de Cope. Así, se han puesto de manifiesto la existencia de otras ocupaciones pre y protohistóricas (San Nicolás y Martínez, 1987). La forma común de poblamiento en este período fueron las cuevas y abrigos, junto a zonas productivas y de abundante caza y recolección, que acabaron inundadas al paso de los milenios y arrasadas por posteriores explotaciones del lugar (Fig. 2).



**Figura 2.** Imagen donde aparece la topografía y los restos arqueológicos encontrados en la cueva C-6 ubicada en Cabo Cope (Murcia). Fuente; EspeleoAguilas.

### 3.5.2.2. La cueva de los Aviones

La cueva semisumergida de los Aviones se comenzó a estudiar en 1985 por parte de la Dirección Regional de Cultura y con el apoyo de la concejalía del Ayuntamiento de Cartagena (Murcia). El abrigo ubicado en el Dique de Navidad fue descubierto en 1980 y conservaba muy poca estratigrafía, si se la compara con la potencia que debió tener en su día, ya que el oleaje fue vaciando poco a poco todo registro arqueológico. El refugio de la cueva de los Aviones tuvo una gran importancia cuando el nivel del mar era más bajo que el actual. El estudio arqueológico destacó la importancia de los útiles de sílex y cuarzo, ya que se encontraron desde piezas musterienses, concretamente puntas y raederas en el estrato I, hasta lascas y pseudolascas *Levallois* en el estrato IV.

De este modo, la cueva de los Aviones fue utilizada como hábitat por primera vez durante la transgresión u oscilación positiva marina, mientras que posteriormente tuvo otras tres ocupaciones con una fase cultural similar. Finalmente, nuevas variaciones del nivel del mar hicieron inhabitable el abrigo. La industria lítica podría considerarse tipo Quina (Bordes, 2000). Las características geográficas y medioambientales de la cueva la hicieron ideal para el hábitat humano, ya que estaba junto a zonas con abundante agua potable y con abundante materia prima.

La actividad cazadora y carroñera se basó, según los restos óseos aportados por el depósito arqueológico, en caballos, cabras y conejos y respecto al marisqueo las especies más consumidas fueron el mejillón, la lapa y la monodonta, todas propias de roca (Montes, 1991; Bordes, 2000) (Fig. 3).



**Figura 3.** Imágenes de la cueva de los Aviones; (A) El sitio visto desde un rompeolas en el puerto de Cartagena. (B) Vista general de la cueva. Remanente del Pleistoceno brechado antes (C) y después (D) de su excavación de 1985. Los círculos punteados en (C) y (D) indican la posición de la colada fechada, claramente sobre el depósito excavado. Fuente; (Hoffmann *et al.*, 2018).

### 3.5.2.3. La cueva Vanguard en Gibraltar

Uno de los proyectos hasta la fecha más completos que se han realizado en la península ibérica, fue llevado a cabo por el equipo del antropólogo Clive Finlayson en “La cueva de Gorham” dentro del Proyecto de las cuevas de Gibraltar (Finlayson *et al.*, 2008). Aunque realmente esta cavidad está completamente en la superficie terrestre siendo tan solo en su cueva vecina, denominada Vanguard Cave, donde se encontraron importantes restos de paleo fauna explotadas por los neandertales en el Paleolítico Medio (Stringer *et al.*, 2008). Los estudios centrados en la dieta de los neandertales han proporcionado

una perspectiva histórica diferente, ya que además del carroñeo, como estrategia de subsistencia, también practicaban la caza de forma frecuente. Los estudios paleontológicos de los niveles de ocupación de los neandertales, en Gibraltar, refuerzan su capacidad de cazar una amplia variedad de fauna y no muestran diferencias evidentes con el comportamiento de caza humano del Paleolítico Superior (Waechter y Flemming, 1963; Finlayson et al., 2001; Finlayson *et al.*, 2008; Stringer *et al.*, 2008) (Fig. 4).

De este modo, los últimos estudios evidencian que, en los yacimientos arqueológicos de Gibraltar, los humanos del Paleolítico Medio tenían una dieta a base de moluscos, focas, delfines y peces, durante un amplio período de tiempo. Los niveles ya posteriores, de ocupación humana del Paleolítico Superior en Gorham, muestran un comportamiento y unas estrategias de sus pobladores similares al de los neandertales, lo cual les permitió explotar mejor los recursos marinos (Stringer *et al.*, 2008).



**Figura 4.** Fotografía del Mar de Governor's Beach, en el lado sureste de la Roca, que muestra la cueva de Vanguard y la cueva de y Gorham. Fuente; (Stringer *et al.*, 2008).

### 3.5.2.4. El Complejo del Humo

Esta cavidad, ubicada en la barriada de la Araña (Málaga), está situada a 100 metros de la costa y da nombre por extensión a todo el carst conocido como el “Complejo del Humo”. La caverna está compuesta por una serie de galerías de no muy grandes dimensiones y por lo general de difícil tránsito. Su génesis se produjo por disolución de la escama de calizas jurásicas por las aguas de lluvia y los procesos de carstificación acarreados, combinados con los desprendimientos de grandes bloques del techo (Ramos, 2015).

Concretamente el Abrigo 3, habitado por el hombre de Neanderthal, ofrece una abundante muestra de material arqueológico, con restos de talla, fuego y cocina. Concretamente, en los trabajos de limpieza y protección realizados en 1983, 1984, 1986 y 1999, se recuperaron 112 restos líticos y algunos huesos y malacofauna. Todos los materiales rescatados apuntan a un horizonte cronológico cultural entre el Paleolítico Medio y el Paleolítico Superior. El resto de industrias no están claramente representadas, incluidos los horizontes postpaleolíticos, hecho comprensible si tenemos en cuenta que la entrada a la cueva estaba obstruida hace 21.300 años (Ramos, Aguilera y España, 2001) (Fig. 5).



**Figura 5.** Complejo cárstico de la cueva del Humo en La Araña (Málaga). Fuente; (Ramos, 2015).

### 3.5.3. Historiografía de otras cavidades litorales

#### 3.5.3.1. La cueva Furninha

La cueva Furninha, también conocida como cueva de Dominique, está situada a 15 metros sobre el nivel del mar, en la vertiente sur de la península de Peniche (Portugal).

El estudio del conjunto arqueológico analizado obtuvo un total de 389 piezas provenientes de contextos del Paleolítico Medio y Paleolítico Superior, siendo en su mayoría de este último periodo. El análisis de los materiales demostró la presencia de una ocupación humana durante el Paleolítico Medio, con una industria constituida por materiales usuales de esta fase como; raspadores, denticulados, muescas y núcleos discoideos. Sin embargo, y contrariamente a lo que afirmó Zilhão (1997), la mayoría de los materiales líticos encontrados apuntan hacia una ocupación bastante intensiva de la cavidad, con una cronología también larga durante el Paleolítico Superior (Zilhão, 1997; Bicho y Cardoso, 2010; Brugal *et al.*, 2012).

De este modo, puede afirmarse que la cueva Furninha tuvo una ocupación humana, que comenzó en el MIS 4 y se prolongó durante las dos fases siguientes, hasta el final del Pleistoceno. La presencia de materiales musterienses, aunque en número reducido, puede significar que la presencia de neandertales se dio hasta épocas bastante tardías, como es el caso de otros sitios del Sur de la península ibérica (Bicho y Cardoso, 2010).

Además, la ocupación de la cueva de Furninha se prolongó hasta el Paleolítico Superior, como se puede verificar por la diversidad de la tipología de los núcleos e instrumentos retocados. Los materiales estudiados indicaron la presencia de sucesivas ocupaciones humanas durante el Gravetiense, el Solutrense y el Magdaleniense. Concretamente, en este último periodo del Tardiglaciario, está marcada por un conjunto relativamente pequeño de piezas. Concretamente, laminillas y núcleos de tipo ortogonal, muy característicos del Magdaleniense de Rio Maior y también del Algarve, los cuales sirven como fósiles-directores de la

última ocupación paleolítica de la cueva Furninha (Bicho y Cardoso, 2010; Brugal *et al.*, 2012) (Fig. 6).



**Figura 6.** Entrada a la cueva cárstica litoral de Furninha, en la península de Peniche (Portugal).

Fuente; [allaboutportugal.pt](http://allaboutportugal.pt)<sup>19</sup>.

### 3.5.3.2. La cueva de Figueira Brava

La cueva de Figueira Brava se encuentra en el brazo sur de la cordillera de Arrábida, entre Alpertuche y Fortaleza en Portinho da Arrabida (Portugal). Concretamente, corresponde al ensanchamiento de una falla por erosión marina sobre biocalcarenitas del mioceno durante el Pleistoceno Superior (Pais *et al.*, 2000; Pais y Legoinha, 2000). En esta cavidad se encontraron algunos restos neandertales entre residuos de comida humana e implementos musterienses. Los restos humanos eran todos compatibles y correspondían a un individuo de 16 a 17 años, muy probablemente masculino. El único diente encontrado, un P4 superior izquierdo, mostraba varias características que permitieron atribuirlo a un neandertal (Antunes y Cunha, 1992; Egocheaga *et al.*, 2004).

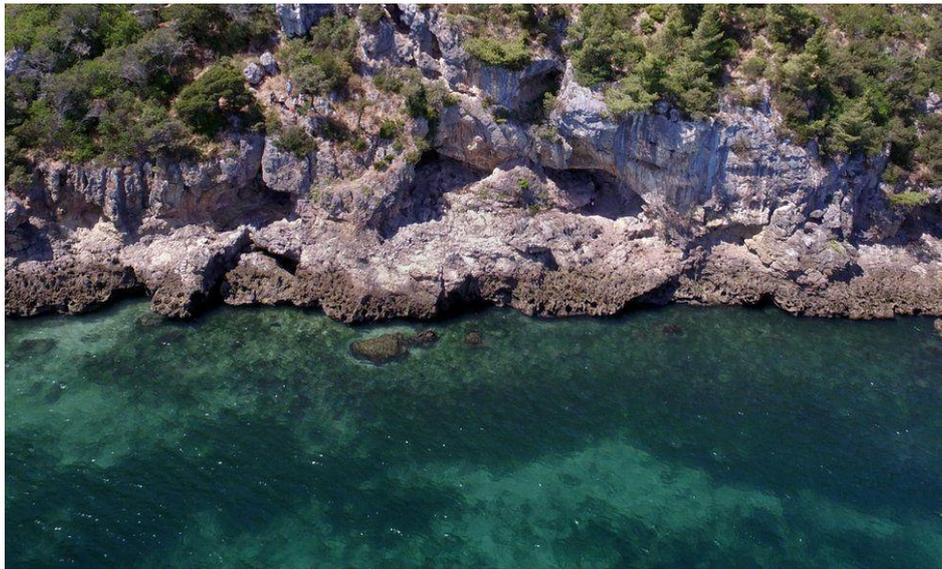
Por otra parte, los restos de industria lítica de la cueva de Figueira Brava consistieron en casi mil artefactos, siendo ésta una industria no permanente sin

---

<sup>19</sup> <https://www.allaboutportugal.pt/pt/peniche/recursos-naturais/gruta-da-furninha>.

una evolución tipológica concreta. Esto probablemente es debido a la baja calidad de los materiales locales utilizados. Según el criterio del análisis tradicional de Bordes (Bordes, 2000), aplicada a las industrias del Paleolítico Medio, se puede decir que la industria lítica de Figueira Brava es típicamente musterienne, rica en denticulados, sin facies *Levallois*, mientras que la industria lítica correspondiente al Paleolítico Superior es meramente residual (Raposo y Cardoso, 2000).

Estudios recientes han presentado resultados de Figueira Brava (Portugal) como un lugar que sirvió de refugio a poblaciones neandertales hace aproximadamente entre 86 y 106 mil años. Este estudio revela que la pesca y la recolección de mariscos contribuyeron significativamente a la economía de subsistencia de los habitantes y nos muestra que la relevancia de este descubrimiento radica en que, hasta el momento, no había muchas señales de estas prácticas tan comunes entre los neandertales (Zilhão *et al.*, 2020) (Fig. 7).



**Figura 7.** Vista de la entrada de la cueva Figueira Brava en Arrabida (Portugal). Foto; Joao Zilhão. Fuente; [bbc.com](https://www.bbc.com/news/science-environment-52054653)<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> <https://www.bbc.com/news/science-environment-52054653>



## CAPÍTULO 4

# CONTEXTO GEOLÓGICO Y CLIMÁTICO

*El paisaje es “el área en la que, y a través de la cual, se construyen, representan, reinventan y modifican la memoria, la identidad, el orden social y la transformación.”*

*Bernad Knapp y Wendy Ashmore (Knapp y Ashmore, 1999)*

## 4. CONTEXTO GEOLÓGICO

### 4.1. BREVE DEFINICIÓN DE CAVIDAD SUBACUÁTICA Y SISTEMAS CÁRSTICOS

Durante las últimas décadas son muchos los trabajos que se han centrado en el estudio del carst y es por ello que se dispone de un buen número de obras de referencia (Waltham, 2002; Ford y Williams, 2013; Veress, 2020). Otros trabajos más específicos, como los de Iñaki Antigüedad, Tomas Morales y Jesús Ángel Uriarte (Waltham, 2002; Antigüedad, Morales y Uriarte, 2007; Ford y Williams, 2013) o el de Joaquín Ginés (Ginés, 2000) se han centrado en la parte vadosa y en los acuíferos cársticos. Los sistemas cársticos se encuentran en muchas regiones del mundo, siendo los más frecuentes los desarrollados en formaciones de rocas carbonatadas que han sido afectadas por la fracturación, aunque los podemos encontrar también en yesos y sales. La carstificación origina toda una jerarquización del drenaje subterráneo del suelo, desde la superficie hasta la surgencia o manantial. En el acuífero cárstico la función capacitiva reside en la propia matriz rocosa, que a su vez presenta distinta permeabilidad en función del tipo de roca, mientras que la red de conductos es la que asegura la función transmisiva del flujo. A grandes rasgos, los afloramientos carbonatados de Europa cubren un 35 % del territorio y buena parte de estas formaciones carbonatadas presentan un cierto grado de carstificación, por efecto de la disolución, lo que les confiere el carácter de acuífero cárstico.

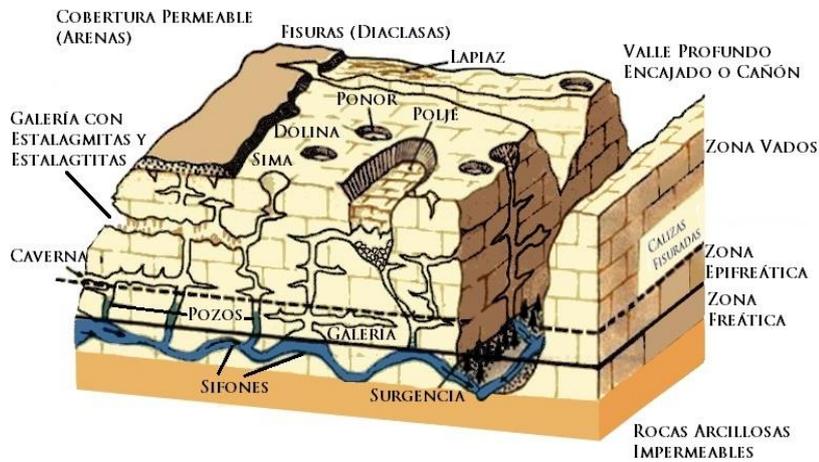
En algunos países europeos el peso de las aguas cársticas es muy significativo y representa una parte importante del agua suministrada: Austria y Eslovenia (50 %); Bélgica, Croacia, Eslovaquia y Francia (25-35 %); Reino Unido y Suiza (15-20 %) y España (12 %), según datos recogidos en el informe de Cooperation in Science and Technology COST 65 (Goldscheider, 2005; Fernández y Baquero, 2006; Ford y Williams, 2013) (Fig. 8).



**Figura 8.** Afloramientos carbonatados en Europa. Fuente; (Fernández y Baquero, 2006).

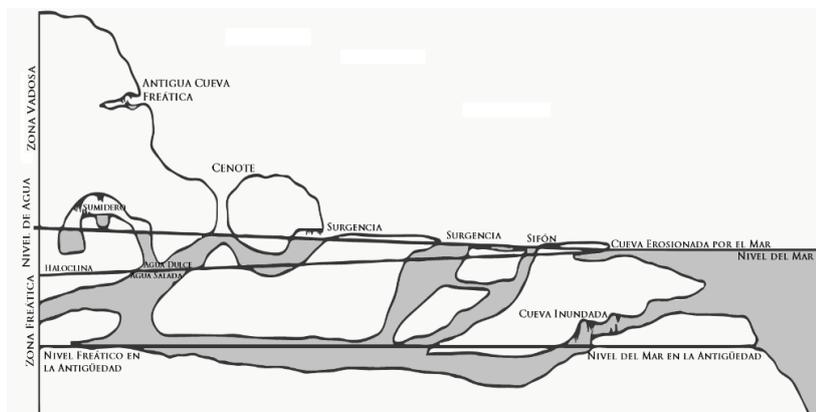
Los acuíferos cársticos muestran singularidades que los diferencian del resto de acuíferos en su exploración, explotación y gestión. Presentan, por una parte, características comunes a las redes hidrográficas (drenaje organizado en conductos) y, por otra, características propias de los acuíferos porosos (matriz rocosa que puede tener una cierta porosidad primaria, o secundaria por fracturación o incipiente carstificación). Es decir, presentan a la vez una función transmisiva (capacidad para el paso del agua) en los conductos, que gobierna el flujo de los recursos, y una función capacitiva (capacidad para contener agua) en los bloques, que gobierna el almacenamiento de las reservas. Pero, lo que caracteriza al acuífero cárstico es su heterogeneidad organizada, es decir, los huecos que la disolución de la roca va originando, y el propio flujo que condiciona la disolución, se van jerarquizando desde arriba, la superficie del terreno, donde se produce la recarga, hacia abajo, la surgencia (manantial), donde se produce la descarga (Fig. 9). Esta heterogeneidad explica las dificultades que habitualmente aparecen en la exploración de estos acuíferos, ya que son pozos muy próximos entre sí y pueden presentar rendimientos totalmente diferentes, según la posición que cada pozo tenga respecto a la estructura interna de drenaje. Es por

esta razón que, cualquier método de exploración que no tenga en cuenta esta heterogeneidad del sistema cárstico es difícil que tenga resultados óptimos.



**Figura 9.** Modelo conceptual del carst. Fuente; (Fernández Valderrama, 2004).

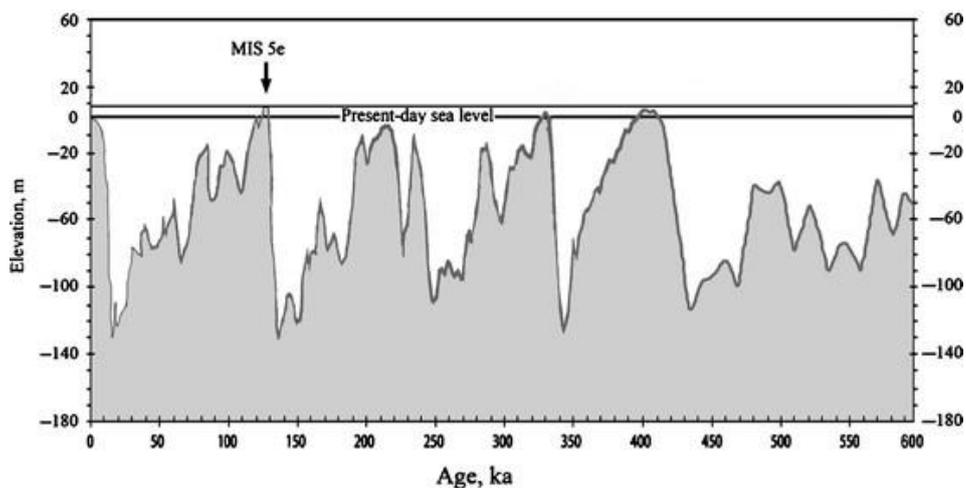
Hay que señalar también que el origen y evolución espaciotemporal de estas formas depende de factores geológicos, tectónicos, hidráulicos, fisicoquímicos y biológicos. Las regiones cársticas tienen unas características específicas, tanto en lo relativo a la organización de los flujos hídricos superficiales y subterráneos como a la relación entre ambos, y diferencian claramente a estas regiones de cualquier otra, y a los acuíferos cársticos de cualquier otro tipo de acuífero (Antigüedad, Morales y Uriarte, 2007; Campbell, 2017) (Fig. 10).



**Figura 10.** Esquema de las diferentes morfologías cársticas subacuáticas. Fuente; (Campbell, 2017).

## 4.2. OSCILACIONES CLIMÁTICAS Y DEL NIVEL DEL MAR

Otro factor importante en el carst costero son las oscilaciones climáticas, especialmente las que se produjeron durante el Pleistoceno. Estas oscilaciones tuvieron consecuencias importantes en las oscilaciones del nivel del mar, especialmente durante los estadios isotópicos (MIS) fríos, cuando el nivel descendió, y también durante los cálidos, cuando el nivel ascendió. Así, por ejemplo, sabemos que cronológicamente durante el último estadio glacial (MIS 4-2) y en concreto durante el máximo glacial (LGM -*Last Glacial Maximum*-), hace 20 ka BP, el nivel medio del mar mediterráneo descendió más de 100 metros y, desde entonces, la tendencia general correspondiente con el MIS 1 ha sido la de un estadio cálido (Gráfico 1).



**Gráfico 1;** Oscilaciones del mar Mediterráneo en los últimos 600.000 años (ka), el mar alcanzó una elevación máxima de 5 a 10 m sobre el nivel del mar actual durante el estadio MIS 5, y al menos dos veces más durante el Pleistoceno Medio. Hay que señalar también que el nivel descendió más de 100 m por debajo del nivel del mar actual, al menos cinco veces a lo largo del Pleistoceno Medio y Superior. Fuente; (Lichter *et al.*, 2010).

Desde el principio del Holoceno hasta ahora, el nivel del mar ha subido aproximadamente 35 metros y casi 120 metros desde el último estadio glacial, por lo que durante gran parte de la historia de la humanidad (90%) los niveles del mar han dejado expuestos grandes extensiones de terreno, donde probablemente los

seres humanos encontrarán lugares de asentamiento propicios cerca de la orilla (Lichter *et al.*, 2010).

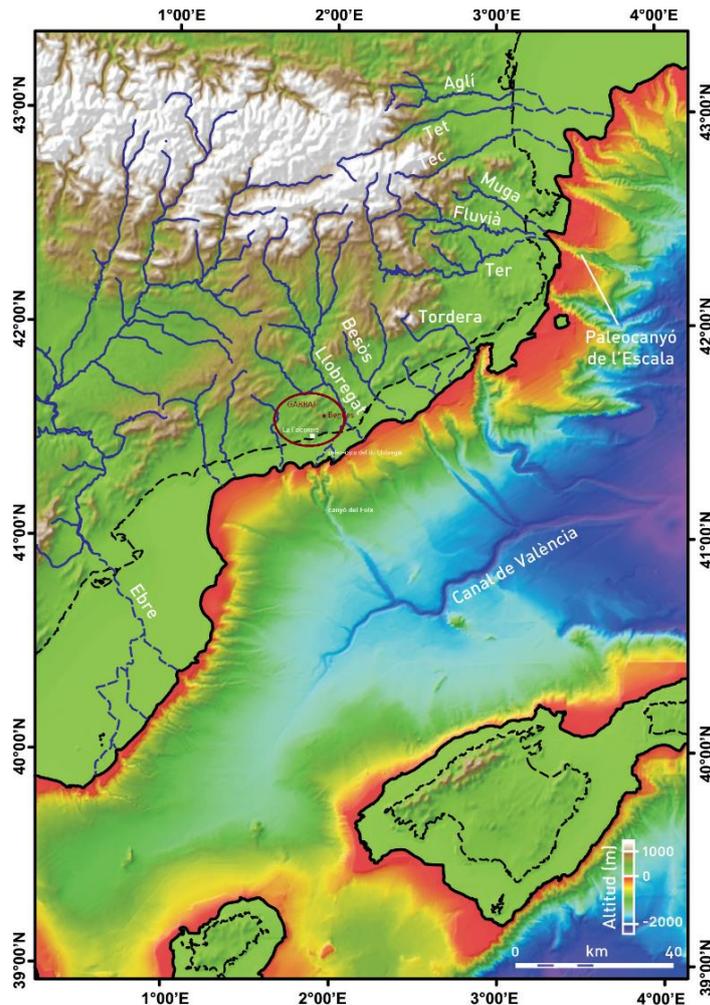
Debido a que muchas de las grandes transformaciones en la Prehistoria se dieron cuando el nivel del mar era más bajo que en la actualidad, incluyendo; los orígenes de la pesca, la dispersión de los primeros pobladores, los inicios de la navegación o las primeras economías agrarias, etc., nos hace pensar que probablemente todavía nos quede mucho por comprender de estos primeros pobladores que habitaron nuestro planeta (Campbell, 2016, 2018).

Concretamente, se han localizado más de 3.000 yacimientos arqueológicos prehistóricos en el fondo del mar, muchos de los cuales han sido estudiados, topografiados y en algunos casos excavados. Su cronología se extiende entre los 500.000 a 5.000 años de antigüedad, y se sitúan desde lugares cercanos a la costa actual hasta profundidades de 130 metros (Flemming, 2020). Esto se debe a que las regiones costeras soportaban una mayor concentración de población que las zonas interiores, debido a las mejores condiciones climáticas, a un óptimo suministro de aguas subterráneas y fluviales, a unas condiciones productivas envidiables para la vida vegetal y por supuesto a una mejor disponibilidad de recursos marinos (Campbell, 2017).

A modo de ejemplo, y como contextualización, si nos fijamos en la costa del Garraf (Barcelona), donde se encuentra la cova de la Falconera, comprobamos que, respecto a los niveles del paleosuelo sumergido, el aumento del nivel del mar, desde una perspectiva arqueológica y paleo ambiental<sup>21</sup>, evidencia una clara preservación del paleo paisaje en forma de canales de ríos sumergidos, depósitos en terrazas asociadas, turbas y sedimentos terrestres (Aymamí, 2007; Freixes *et al.*, 2021; Fumás, 2022a) (Fig. 11).

---

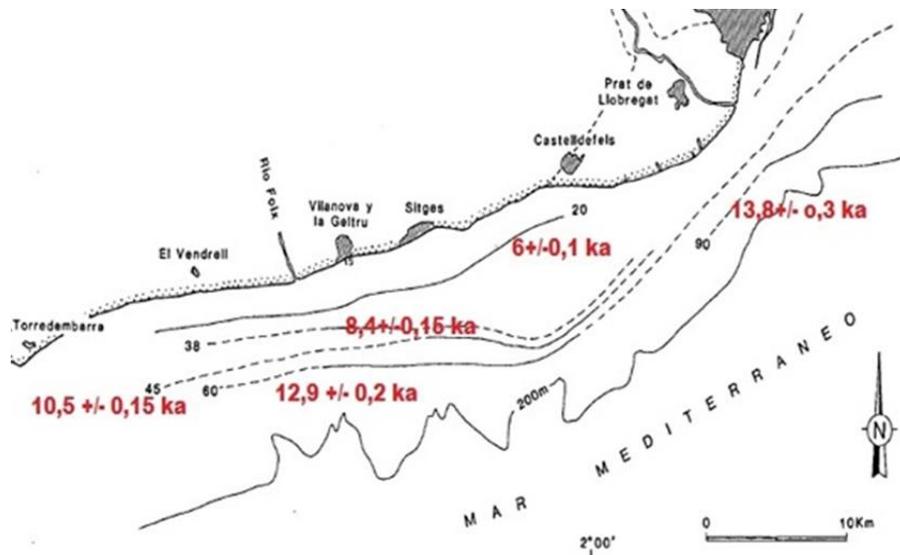
<sup>21</sup> El estudio de los cambios geológicos e históricos del nivel del mar constituye un aspecto importante también en la investigación sobre el cambio climático y el calentamiento global. Además de los peligros inminentes resultantes de la inundación de áreas bajas a lo largo de las regiones costeras, el aumento del nivel del mar también puede provocar la erosión de las playas, la intrusión de sal en los acuíferos de agua dulce y otros daños al medio ambiente costero (Lichter *et al.*, 2010).



**Figura 11.** Reconstrucción paleogeográfica del mar Catalano-balear y las cuencas fluviales que drenaban durante el último máximo glacial (21.000 años BP). En la imagen se observa el ensanchamiento de la planicie costera (en verde) y la posición de la línea de costa hipotética (línea continua) consecuencia del bajo nivel del mar en el último máximo glacial. Además, en la presente reconstrucción se contemplan las posiciones de los cursos bajos y las desembocaduras de las cuencas antecesoras de algunos ríos actuales. La línea negra discontinua indica la posición de la línea de costa actual. Fuente; (Amblàs, 2012).

Desafortunadamente, la construcción de los distintos puertos deportivos y el dragado del fondo marino, para rellenar las playas de arena de los municipios turísticos circundantes, ha cubierto la paleo costa tanto del Garraf como de otras poblaciones litorales de millones de toneladas de arena de varios metros de altura, lo cual hacía inviable cualquier estudio estratigráfico en el área próxima a la boca de las cuevas sumergidas que posibilitara la ampliación del conocimiento del área exterior a la cavidad. En el caso del mar Mediterráneo se sabe que de manera cronológica, durante el último estadio glacial, el nivel medio de éste descendió hasta valores que oscilan de los -100 a -140 m respecto a la actualidad (Clark

*et al.*, 2009). Así, durante gran parte de la historia de la humanidad (90 %) los niveles del mar han dejado grandes extensiones de terreno expuesto, donde los seres humanos probablemente encontraron lugares de asentamiento cerca de la costa (Fig. 12).



**Figura 12.** Reconstrucción de la línea de costa durante la transgresión versiliana con relación a los niveles de estabilización marina. Última transgresión marina registrada en el Mediterráneo desde la última glaciación desde el 21.000 BP hasta la estabilización de hace unos 5.000 a BP. Fuente; (Checa *et al.*, 1988).

Desde entonces, la tendencia general ha sido el calentamiento y la consecuente transgresión marina que ha contribuido a inundar las cuevas litorales de la península ibérica donde sus formaciones carbonatadas han permitido que se desarrolle un importante sistema cárstico (Ginés *et al.*, 2012). Es por esta razón que, la mayor parte de las cuevas que hoy se encuentran inundadas, presentaban características iguales, tanto en la prehistoria como en época histórica (Flemming y Antonioli, 2017).

## CAPÍTULO 5

# METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

*"La arqueología subacuática no es una actividad autónoma, ni una disciplina arqueológica, sino una técnica particular al servicio de la arqueología; técnica que permite a la arqueología extender su campo de investigación al rico mundo subacuático".*

*Patrice Pomey (1943-2021)*

## 5. METODOLOGÍA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

### 5.1. EL REGISTRO GRÁFICO SUBACUÁTICO Y LOS OBJETIVOS DE LA PLANIMETRÍA MANUAL

En primer lugar, para entender la definición y descripción de las diferentes técnicas de registro planimétrico de un yacimiento arqueológico en el interior de una cueva sumergida debemos reflexionar y entender que tipos de registros son los más adecuados y como se obtienen. Para ello es interesante consultar la obra del técnico de patrimonio cultural de la Diputación Foral de Guipúzcoa, Manu Izaguirre Lacoste, quien realizó un estudio completo y conciso sobre las diferentes variantes técnicas de registro en su obra “El registro gráfico subacuático: La topografía manual” (Izaguirre, 2010). En nuestro caso, obviaremos las más complejas y complicadas debido a que la casuística de las cavidades sumergidas y la rápida pérdida de visibilidad en su interior limita hasta el extremo cualquier tipo de trabajo planimétrico en su interior.

Debemos tener en cuenta la problemática que se nos presenta con las agujas magnéticas, ya que las líneas de fuerza del campo magnético terrestre se orientan siguiendo los meridianos magnéticos hacia el Norte Magnético (Nm), el cual no coincide con los meridianos geográficos (Ng). Además, en cada posición geográfica de la tierra, el ángulo que forman ambos meridianos es diferente y esto recibe el nombre de Declinación Magnética (Dm). Además, cabe señalar que los objetos metálicos que rodean una brújula o aguja magnética constituyen un campo magnético que perturba el funcionamiento de ésta puesto que no señalará el Norte Magnético (Nm) sino una dirección desviada e incorrecta denominada Norte de Aguja (Na). Al ángulo que forman el Norte Magnético (Nm) y el Norte de la Aguja se le denomina Desvío (▲). Por último, para conocer la Corrección Total de la aguja (Ct) se debe sumar la Declinación Magnética (Dm) al Desvío (▲).  $Ct = Dm + \blacktriangle$  (Izaguirre, 2010).

## 5.2. LOS LEVANTAMIENTOS GRÁFICOS

El levantamiento gráfico es el cálculo de los distintos métodos empleados para representar la relación geométrica existente entre distintos puntos. Si para registrar dicha relación se va a utilizar como referencia el plano horizontal recurriremos entonces a las medidas horizontales denominadas planimetría. Pero si, por el contrario, vamos a registrar también la altura de éstos puntos, es decir sus cotas de profundidad ( $z$ ), estaremos en el campo de la altimetría, donde deberemos representar las cotas batimétricas, las secciones verticales, las curvas de nivel terrestre o las curvas isobatas entre otras representaciones gráficas (Izaguirre, 2010).

## 5.3. LAS TÉCNICAS TOPOGRÁFICAS MANUALES

Dependiendo de la coyuntura, logística, casuística, visibilidad y cavidad sumergida a estudio las técnicas topográficas a utilizar serán unas u otras. Aunque Izaguirre en su estudio no contempla la opción del trabajo topográfica en cuevas sumergidas sí que nos da unas pautas metodológicas que deben ser tenidas en cuenta. Por esta razón, haremos un breve repaso de todas y cada una de ellas, adaptando la técnica topográfica a utilizar al espacio confinado donde se encuentre el yacimiento que pretendamos topografiar y, para ello, deberemos planificar no solo la técnica a utilizar sino también la inmersión, el equipo humano y el equipamiento técnico adecuado antes de comenzar el trabajo.

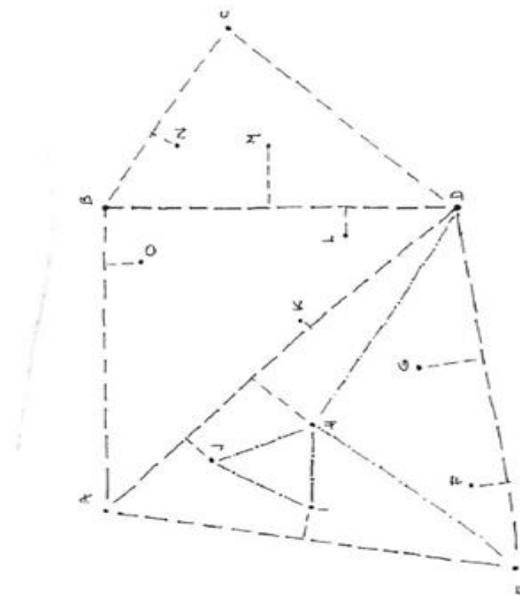
Los sistemas de toma de datos en topografía planimétrica se dividen en; cálculo topográfico en distancias, cálculo topográfico por distancias y ángulos y cálculo por ángulos. En nuestro caso, las mediciones manuales fueron utilizadas tan solo de manera residual priorizando medios tecnológicos para la consecución de mediciones rigurosas de distancias, profundidades y acimuts.

Algunas de las mediciones manuales topográficas utilizadas en nuestro estudio fueron;

### 5.3.1. La triangulación

Este es un procedimiento geométrico básico para la construcción de triángulos gracias al conocimiento de las longitudes de sus lados. La triangulación es utilizada en prospecciones o en la topografía entre conjuntos y en yacimientos sin estructura fija de cuadrícula. Para comenzar este tipo de topografía es necesario rotular con anterioridad cada uno de los puntos a topografiar (Izaguirre, 2010).

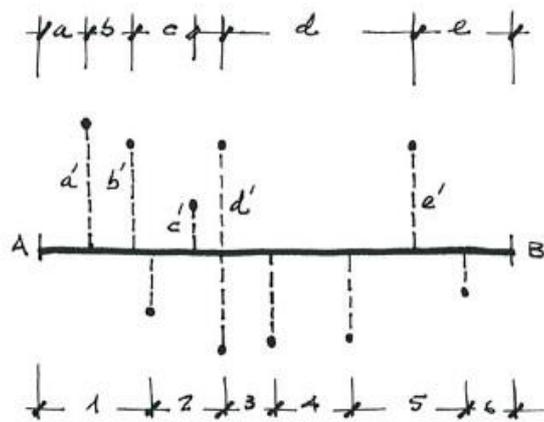
La triangulación se establecerá en planos horizontales cuyo número podrá variar según el número de desniveles a salvar. A mayor número de puntos a triangular mayor riesgo de error, por eso a la hora de planificar una triangulación será necesario crear un gran polígono uniendo puntos periféricos del conjunto, de modo que sus lados y diagonales constituyan bases de otras triangulaciones de un número más reducido de puntos interiores, tratando que en las triangulaciones los triángulos sean lo más equiláteros posibles (Izaguirre, 2010) (Fig.13).



**Figura 13.** Representación gráfica de un polígono topográfico de triangulación estructurado a base de grandes triángulos básicos. Fuente; (Izaguirre, 2010).

### 5.3.2. Eje Cartesiano

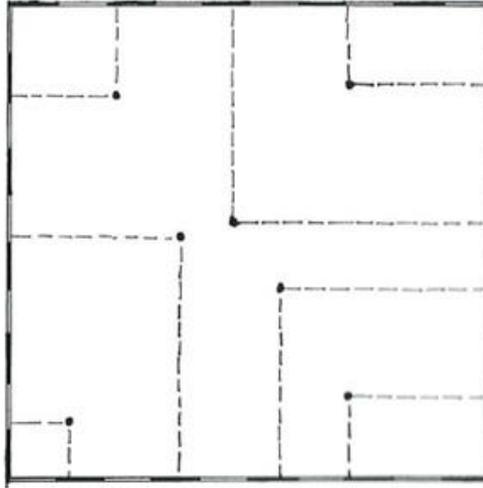
Para su realización deberemos crear un eje que materializaremos con una cinta métrica, la cual será la base de la proyección cartesiana de los distintos puntos a topografiar. Desde cada uno de esos puntos de registro se lanzará otra línea perpendicular al eje, midiendo cada perpendicular y las separaciones entre ellas (Fig. 14).



**Figura 14.** Representación del eje cartesiano con las proyecciones “y”. Fuente; (Izaguirre, 2010).

### 5.3.3. Cuadrícula individual rígida

Las cuadrículas pueden estar ya montadas antes de la inmersión con tramas habitualmente de 10 x 10 o 20 x 20 cm. De este modo, para registrar cada elemento dentro de la cuadrícula se tomarán sus coordenadas ortogonales X e Y a los ejes base a través de cuadros de la malla colocados horizontalmente (Izaguirre, 2010) (Fig. 15).



**Figura 15.** Representación de la cuadrícula rígida en la cuyos lados se representan los ejes “x” e “y” sobre los que se registran las proyecciones correspondientes. Fuente; (Izaguirre, 2010).

#### 5.4. PRINCIPIOS BÁSICOS DE TOPOGRAFÍA EN CUEVAS SUMERGIDAS

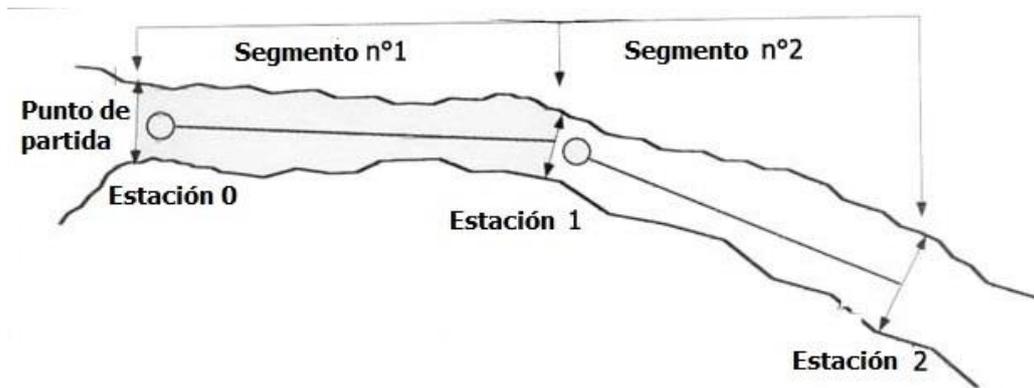
Los distintos métodos mencionados hasta ahora en topografía aplicada a la arqueología subacuática suelen utilizarse también muy habitualmente en aguas abiertas donde gracias a la utilización del GPS y a una boya podemos obtener uno o varios puntos en el lecho marino y así ubicar en el espacio nuestras mediciones. Además, existen otras formas de situar elementos en el mar, sobre todo si están cerca de la costa, mediante filiers y geoposicionamiento con estación total y nivel con lectura de grados o con el uso de la trigonometría. El principal problema que aparece en la topografía en cuevas sumergidas está en la obtención de ese primer punto de referencia que es el que nos permita obtener el resto de los puntos.

Aunque a lo largo de la tesis veremos diferentes métodos utilizados en la obtención de ese primer punto de georreferenciación básico, la técnica más usual es la del hilo guía o hilo de Ariane. Es por esta razón por la que debemos detenernos a explicar el cómo y porqué de la obtención de estos puntos y mediciones en cuevas sumergidas.

Debemos tener presente que en ocasiones los yacimientos a topografiar están a cientos de metros en el interior de la cavidad sumergida y eso dificulta el logro de la obtención de ese punto de referencia primario que orientará nuestra topografía.

El procedimiento de mapeo es siempre el primero a realizar en el estudio inicial de la cueva. La precisión en las mediciones de cuevas sumergidas se ve obstaculizada por las importantes limitaciones de tiempo impuestas por el entorno, principalmente por las condiciones de baja visibilidad, los requisitos de descompresión y los limitados suministros de gas para respirar.

La técnica de topografía estándar consiste en la medición del acimut y la distancia entre estaciones de prospección consecutivas y la profundidad, anchura y altura de cada una de esas estaciones. Las estaciones de medición normalmente se establecen en los giros del hilo guía y en los cruces entre los pasajes de las cuevas. Además, es común establecer estaciones adicionales para marcar puntos de interés como salas grandes, sifones, etc. (Vasseur, 2006) (Fig. 16).



**Figura 16.** Método de topografía clásica manual mediante medición de segmentos a través del cálculo radial en estaciones. Fuente; Adaptación (Vasseur, 2006).

De este modo, los indicadores mínimos que se deben obtener en cada estación de medición son; el número de estación, el acimut a la siguiente estación, la distancia a la estación anterior, la profundidad de la propia estación, la distancia a la pared derecha, la distancia a la pared izquierda, la distancia al techo, y la distancia al suelo de la cavidad (Vasseur, 2006).

### **5.4.1. Lecturas del acimut**

Las lecturas del acimut se toman con una brújula orientando el plato de ésta (línea de Lubber) paralelamente a la línea guía, en la dirección de la medición, rotando el bisel de tal manera que la flecha de orientación coincida con la flecha norte de la aguja de la brújula, y posteriormente leyendo el rumbo del bisel en la línea de lectura del plato de la brújula. Las lecturas tomadas de esta manera de una brújula de navegación pueden considerarse precisas dentro de  $\pm 1^\circ$ .

### **5.4.2. Mediciones de distancias**

La distancia en el propio hilo se suele medir de distintos modos, o bien colocando etiquetas numeradas o haciendo nudos. Ambas actuaciones deben hacerse antes de desenrollar el hilo en el interior de la cueva. Así, se calcula la distancia entre las estaciones de prospección contando y registrando el número de nudos en la línea de prospección entre estaciones consecutivas y estimando la longitud de la línea utilizada para las envolturas y ataduras y la distancia entre esas características y el nudo más cercano. Las mediciones de distancia realizadas de esta manera pueden considerarse con una precisión de  $\pm 1$  metro.

### **5.4.3. Mediciones de las paredes**

Las mediciones precisas de paredes suelen ser problemáticas y llevar mucho tiempo y esfuerzo, aunque son el único medio manual por el que se pueden realizar análisis volumétricos y morfológicos de la cavidad y para los análisis de los recursos de aguas subterráneas. Durante la topografía de las cuevas se suelen hacer mediciones radiales de las paredes tomando como punto de origen la estación de control más cercana. Así, los perímetros se determinan midiendo o estimando la anchura y la altura de un paso en cada estación de prospección a lo largo de los transectos perpendiculares al acimut de avance de la línea de prospección. Normalmente se suelen producir superposiciones erróneas entre los

perímetros de paso y la línea de reconocimiento cuando las mediciones no se registran a lo largo de los transectos perpendiculares, lo cual obliga que a ser rectificadas en el proceso de elaboración de la topografía manual (Devos et al., 2004; Huber, 2014).

#### **5.4.4. El sistema de coordenadas**

Para poder georreferenciar un punto concreto del interior de la cavidad necesitaremos de un sistema de coordenadas adecuado. El sistema de coordenadas es el sistema numérico que define la interrelación entre los objetos en el espacio. Los datos del estudio de las cuevas en bruto se presentan en forma de coordenadas polares móviles. Cada una de las estaciones de prospección a lo largo de la línea de prospección puede ser descrita numéricamente en relación con la estación vecina por medio de coordenadas  $(r, \theta)$ , donde  $r$  es la distancia de la estación de partida y  $\theta$  es el acimut. El problema es que las coordenadas son relativas a un origen en movimiento, es decir, describen la ubicación de cada estación en relación con su vecina. El origen en movimiento hace que las coordenadas sean difíciles de procesar por técnicas cartográficas computarizadas e incompatibles con otras formas de datos espaciales. Por otro lado, las coordenadas tridimensionales describen la ubicación de cualquier punto en relación con un origen fijo con coordenadas  $(X=$ abscisa,  $Y=$ ordenada,  $Z=$ profundidad) donde  $X$  es típicamente la distancia entre el punto y el origen en la dirección este-oeste,  $Y$  es la distancia entre el punto y el origen en la dirección norte-sur, y  $Z$  es la distancia vertical entre el punto y el origen. Las distancias relativas en las direcciones  $X$  e  $Y$  de una estación de medición a la siguiente se describen como la latitud ( $\Delta y$ ) y la salida ( $\Delta x$ ).

Una vez calculadas las coordenadas fijas, pueden transformarse en cualquier número de sistemas de referencia geoespacial, como Norte ( $Y$ ), Este ( $X$ ) o latitud ( $Y$ ) y longitud ( $X$ ). Normalmente las cuevas se cartografían y modelan en un sistema de coordenadas relativas en el que todos los puntos que describen la línea de estudio y los perímetros de paso se ubican en función de su distancia a un

origen arbitrario, que normalmente se coloca en la elevación de la superficie del agua en las respectivas entradas de las cuevas (Kincaid, 2000).

#### 5.4.5. Conversión a proyección rectilínea

El primer paso en la realización de la topografía de los mapas de las cuevas es la conversión de las medidas de las distancias a una proyección rectilínea (mapa plano). La conversión se realiza mediante la siguiente ecuación (Tabla 1);

$$dis_{r(i+1)} = \sqrt{(dis_{m(i+1)}^2 - (d_{i+1} - d_i)^2)}$$

*dis<sub>r</sub>* = *distancia rectilínea entre estaciones i y i + 1*  
*dis<sub>m</sub>* = *distancia medida entre estaciones i y i + 1*  
*d* = *profundidad medida entre las estaciones i y i + 1*

**Tabla 1.** Formula a aplicar para aplicar la conversión a una proyección rectilínea. Fuente; (Kincaid, 2000).

#### 5.4.6. Cálculo de las coordenadas cartesianas

Una vez que las medidas de las diferentes distancias son convertidas a una proyección rectilínea, las lecturas de acimut deben ser convertidas a rumbos para conocer los datos del estudio en coordenadas cartesianas. Una vez determinadas las coordenadas, se calcula la distancia relativa en las direcciones X e Y (latitud y salida) con ecuaciones trigonométricas en las que el signo del valor resultante depende del cuadrante en el que se midió el acimut (Tabla 2).

Cuadrante	Acimut (AZ)	Rumbo ( $\theta$ )	Latitud ( $\Delta y$ )	Salida ( $\Delta x$ )
I	0° - 90	Az.	+d, cos $\theta$	+d, sin $\theta$
II	90 - 180	180° - Az.	-d, cos $\theta$	+d, sin $\theta$
III	180 - 270	Az. - 180°	-d, cos $\theta$	-d, sin $\theta$
IV	270 - 360	360° - Az.	+d, cos $\theta$	-d, sin $\theta$

**Tabla 2.** Ecuaciones y ejemplos para el cálculo de la marcación, la latitud y la salida de las mediciones del acimut y la distancia, donde (dr) es la distancia rectilínea entre dos estaciones consecutivas. Fuente; (Kincaid, 2000).

Una vez calculadas la latitud y las salidas, se determinan las coordenadas tridimensionales finales (X, Y, Z) de cada una de las estaciones de estudio con las siguientes ecuaciones (Tabla 3);

$$x_i = \sum_1^i \Delta x$$

$$y_i = \sum_1^i \Delta y$$

$$z_i = d_i$$

$x_i$  = Posición de la X respecto a la estación topográfica  
 $y_i$  = Posición de la Y respecto a la estación topográfica  
 $z_i$  = Posición de la Z respecto a la estación topográfica  
 $\Delta x$  = Longitud relativa respecto a la estación topográfica  
 $\Delta y$  = Latitud relativa respecto a la estación topográfica  
 $d_i$  = Profundidad de la estación topográfica

**Tabla 3.** Formula a aplicar para la obtención de las coordenadas X, Y y Z. Fuente; (Kincaid, 2000).

#### 5.4.7. Programas de cartografía de cuevas

En la actualidad existen numerosos softwares de cartografía de cuevas con los que se obtienen automáticamente mapas para su posterior estudio. Debemos entender la importancia de la generación de un mapa previo para poder generar un proyecto científico riguroso y unos protocolos de seguridad exhaustivos. Algunos de los

programas más populares son: Compass2<sup>22</sup>, Wintopo<sup>23</sup> Survex3<sup>24</sup> y WinKarst4<sup>25</sup>. Algunos de estos programas son capaces de trazar un gráfico tridimensional y de realizar diversos análisis estadísticos de los datos incorporados. Sin embargo, muchos de estos programas están programados para calcular los datos de estudio recogidos en cavidades secas, lo que puede hacer que la interfaz de usuario sea problemática. Es decir, los programas de mapeo en cuevas sumergidas están optimizados y diseñados para obtener gráficos bidimensionales y tridimensionales y conjuntos de datos de coordenadas cartesianas adecuados para su incorporación con otros softwares de modelado relacionados con los SIG, aunque muchos de esos programas requieren una interfaz de software MatLab®<sup>26</sup> (Kincaid, 2000).

En el presente trabajo, el software más habitual utilizado por los equipos de exploración y topografía en las diferentes cuevas sumergidas estudiadas fue el wintopo, ya que es un programa rápido, eficaz y muy conocido por los espeleobuceadores que se dedican a la prospección y topografía desde hace años. Para conseguir un registro planimétrico del yacimiento, partiendo como punto de referencia del punto establecido en la propia línea guía, deberemos conocer los conceptos básicos de registro y topografía manual.

## 5.5. LA METODOLOGÍA PROSPECTIVA ACTUAL

Al tratar de desarrollar y mejorar una metodología de investigación centrada en la prospección arqueológica en cavidades sumergidas debemos conocer los antecedentes de este trabajo de campo y para ello es preciso consultar los proyectos arqueológicos subacuáticos que se han desarrollado en esta materia.

---

<sup>22</sup> <https://es.calameo.com/books/0031214366ae65b5ec2da>

<sup>23</sup> <http://wintopo.com/>,

<sup>24</sup> <https://survex.com/>

<sup>25</sup> <http://www.resurgentsoftware.com/winkarst.html>

<sup>26</sup> MatLab es un programa matemático que desarrolla un lenguaje de programación propio. Este lenguaje es interpretado y ejecutado en el entorno interactivo. Además, el lenguaje permite realizar operaciones diversas tanto de vectores como matrices, funciones y programación orientada a objetos., lo cual permite crear modelos de cuevas en 3D a partir de estudios topográficos escasos o dispersos. Es decir, el programa permite la reconstrucción de la superficie de la cueva mediante la incorporación de los datos facilitados. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Actualmente, hay pocos proyectos en todo el mundo trabajando en los cuales se explique la metodología de trabajo empleada en esta área de investigación arqueológica prospectiva. Podríamos mencionar el proyecto BASELINE en Cerdeña, con importante colaboración de los buzos de la GUE (Global Underwater Explorers), o proyectos consolidados como; Proyecto Gran Acuífero Maya (GAM) (De Anda, Ortega y Brady, 2019), el Proyecto Hoyo Negro (Rissolo *et al.*, 2015), el Proyecto CINDAQ en la península de Yucatán (México), el Proyecto Holtun (García, 2014) o el “Proyecto Arqueológico u Lu’umil Maaya wiiniko’ob - Tren Maya”(Barba Meinecke, 2020). Específicamente, y tomando como referencia la metodología utilizada, nos centraremos en este último proyecto, dirigido por la arqueóloga Helena Barba Meinecke del Instituto Nacional de Antropología e Historia de México (INAH) para observar la metodología de prospección utilizada hasta la fecha en los cenotes del Yucatán. Esta metodología es la que hemos aplicado, en parte, en los yacimientos prospectados en las cuevas del Garraf (cova de la Falconera) y en las cuevas de Mallorca (cova de la Font de Ses Aiguades, cova Genovesa y cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou), todos y cada uno de ellos explicados en detalle en la presente tesis.

La metodología de trabajo en el Proyecto Tren Maya se divide en dos fases; una primera fase de prospección visual e instalación de línea de vida, de revisión del equipamiento y planificación del buceo, aplicando la regla de tercios<sup>27</sup>. Esta fase, tiene como objetivos planificar la profundidad para establecer las limitaciones de la inmersión, los perfiles de descompresión.

Durante la prospección se utiliza una línea de vida, la cual consiste en un carrete con cuerda de nylon, que en cada cambio de rumbo es fijada en un punto concreto señalando estaciones, sirviendo así para conocer la ubicación y la distancia bajo el agua. En el caso de que la prospección se realice en una cavidad con desarrollo horizontal, su prospección debe iniciarse en la cavidad más grande y con mayor flujo de agua, para posteriormente acceder a los pasajes secundarios, siempre marcando el camino con la línea guía y colocando en flechas y galletas

---

<sup>27</sup> Esta regla señala que; el primer tercio se utiliza para el descenso, colocación de línea de vida, penetración de ida y prospección; el segundo tercio es utilizado para prospección, documentación (topografía/batimetría), registro y regreso, incluyendo paradas de descompresión, y el tercer tercio se utiliza tan solo en caso de emergencia o de auxilio a otro miembro del equipo (Huber, 2014).

direccionales. Para identificar y señalar los elementos arqueológicos sumergidos, el Proyecto Tren Maya utiliza banderas numeradas, las cuales deben de tener un color que se pueda observar desde la distancia. La línea de vida se deja de forma permanente en el sitio, con un marcaje conocido como galleta que identifique la presencia del grupo de investigación (Huber, 2009; García, 2014; Barba Meinecke, 2020; Barba-Meinecke, Pizá Chavez y Quetz León, 2022).

La segunda fase tiene como objetivo fundamental la documentación, topografía/batimetría y el registro arqueológico concreto. Para ello desde el inicio de la inmersión se comienza con el registro topográfico, denominando a la primera estación topográfica “A1”, el punto de descenso a la cavidad. Desde allí se continúa a través de la línea de vida, previamente instalada, donde cada intersección o amarre es considerado una estación topográfica de control.

La topografía de la cavidad se lleva a cabo utilizando una cinta métrica, o en su defecto, una línea anudada previamente (nudos cada 3 metros). De este modo, se va leyendo el rumbo de la brújula subacuática y anotando el rumbo de estación a estación. Este registro arqueológico subacuático, se complementa mediante captura de imagen: foto, video y fotogrametría, así como elaboración de dibujos. Además, se requiere de marcajes impresos y escalas (balizas escaladas) propios de esta técnica.

Para el registro en dibujo se utilizan las técnicas denominadas; línea base y trilateración, a través de las cuales se logra ubicar a los artefactos con respecto al contexto natural y arqueológico, integrándolos espacialmente al croquis escalado.

Por último, Barba Meinecke (2020) señala la importancia de tomar dos muestras de agua, del fondo del cenote y de la columna de agua durante la parada de seguridad (5 metros), así como de sedimentos para ser analizadas. Además, el Proyecto Tren Maya también apuesta por la recuperación de las evidencias arqueológicas en cenotes, siempre y cuando cumpla con tres aspectos basados en los fundamentos y Anexo de la Convención de la UNESCO 2001 sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático. Para ello es necesario que haya un registro in situ del elemento arqueológico, el de su contexto natural y cultural, que garantice su conservación a posteriori, sobre todo si el elemento se encuentra en peligro de expolio (Barba Meinecke, 2020).

## 5.6. MÉTODOS PROSPECTIVOS DIRECTOS UTILIZADOS

Denominamos métodos prospectivos directos a todos aquellos en los que es necesario la intervención presencial para la consecución de datos de registro topográfico o, en su caso, arqueológico en el interior de una cavidad sumergida.

### 5.6.1. La prospección visual

Una de las técnicas más utilizadas durante las intervenciones arqueológicas realizadas en el marco de la presente investigación ha sido la prospección visual, método inicialmente aplicado para garantizar la seguridad del equipo durante las inmersiones. La primera inmersión ha servido siempre para comprobar el estado de la cueva y para realizar tareas de filmación de vídeo y toma de fotografías, aprovechando la claridad del agua, ya que el sedimento suspendido aparece de forma muy habitual y rápida, evitando cualquier captura fotográfica clara válida para la documentación y el registro arqueológico (Waechter y Flemming, 1963; León, 2003) .

Las tareas principales de prospección han tenido el objetivo de verificar que la línea o hilo guía estaba en condiciones óptimas, condición sine qua non para la realización de la inspección visual del estado de la cavidad. De esta manera, se pudo comprobar dentro de la cavidad si las restricciones de difícil acceso estaban abiertas, si los restos arqueológicos conocidos habían sufrido algún tipo de espoliación y si las condiciones de agua y visibilidad permitían la viabilidad de las tareas previamente programadas.

La prospección visual se realizó como mínimo por tres espeleo-buceadores, dos de los cuales lanzaron, desde un punto específico de la línea guía, una segunda línea secundaria que debía medirse en longitud, profundidad y dirección hasta llegar al lugar específico donde queríamos hacer la prospección visual. De este modo, uno de los tres espeleo-buceadores siempre permanece en la línea principal por razones de seguridad, pasando a realizar asistencia o ayuda si los otros dos no respetan los tiempos indicados en el *briefing* realizado antes de la inmersión (Devos, Le Maillot y Riordan, 2005; Huber, 2009; Al Hamdani *et al.*, 2012).

Como hemos comentado con anterioridad, cualquier tarea arqueológica dentro de una cueva debe siempre ser realizada con la máxima seguridad respetando la regla de los tercios del aire. Además, no se debe perder de vista el hilo guía en ningún momento, puesto que hay que recordar que cuando un espeleo-buceador entra en una cavidad inundada el hilo recibe el nombre de hilo guía pero cuando éste mismo espeleo-buceador sale de la cavidad este hilo se llama línea de vida, ya que es fácil que la visibilidad sea pésima o nula debido a la sedimentación suspendida, a la percolación, a la haloclina y a la termoclina (Huber, 2014).

Las tareas prospectivas visuales al ser aplicadas a la arqueología subacuática deben tener más complejidad que las puramente recreativas. La prospección alcanza una meticulosidad y una rigurosidad aceptable cuando somos capaces de identificar estructuras o artefactos antrópicos sumergidos, los cuales deben ser arqueológicamente catalogables y factibles de georreferenciación. Para ello debemos señalar de algún modo el descubrimiento y geo posicionarlo respecto a la línea guía o hilo de Ariane. Es en ese momento cuando utilizaremos nuestros conocimientos topográficos para ubicar el yacimiento o el hallazgo o cuando nos serviremos de dispositivos electrónicos que nos indiquen la posición correcta dentro de la cavidad.

La prospección visual podría considerarse una técnica que se desarrolla entre las dos fases metodológicas prospectivas, puesto que puede considerarse una técnica topográfica, al medir distancias y acimut desde la línea guía y una técnica documental al realizar un registro mediante los apuntes anotados en la libreta húmeda, en la cual deben quedar reflejados todos los datos obtenidos en la inmersión. Una vez más, al ser una técnica topográfica manual, debemos ser conscientes, no solo de la importancia de conocer la Declinación Magnética (Dm) del lugar geográfico donde estemos tomando los datos, ya que este variara de un lugar a otro, sino también de la inexistencia de posibles campos magnéticos que nos desviarán considerablemente el Norte de Aguja (Na).

Dentro de las múltiples posibilidades que ofrece el registro prospectivo visual apuntaremos cuatro de las mediciones topográficas manuales más importantes, basados en los cálculos de eje cartesiano. Estas se describen en los subapartados que se describen a continuación.

### 5.6.1.1. *Prospección visual lineal primaria*

La prospección visual lineal primaria es la utilizada por su sencillez y rapidez. En las cuevas con mayor progresión se pudo comprobar la viabilidad de la prospección lineal primaria, en la cual dos espeleo-buceadores comprobaron las características generales como; el estado del hilo guía, la visibilidad del agua, la apertura de las restricciones, la posible percolación de las cámaras inundadas y los posibles remanentes arqueológicos y paleontológicos sumergidos existentes.

Si los restos arqueológicos están ubicados bajo la línea guía deben ser señalizados mediante una cookie o galleta colocada en el hilo. Esta señal indica al equipo de inmersión la localización de los restos dentro de la cavidad, midiendo la distancia entre el punto A, o punto de inicio de la línea guía, hasta el punto B (línea A-B), donde se ubica la cookie. Posteriormente, se apuntaba el acimut de la pieza respecto a la línea y al Norte y la profundidad (Fig. 17.1).

### 5.6.1.2. *Prospección visual lineal secundaria*

Una vez terminada la prospección lineal primaria y comprobada la seguridad de la inmersión se procede a la localización de las diferentes cookies colocadas en la línea guía, indicando la localización de posibles restos arqueológicos o paleontológicos. Si los restos arqueológicos no están ubicados bajo la línea, sino que se encuentran desplazados de ésta, se debe lanzar una línea secundaria. Para el cálculo topográfico manual, sin herramientas técnicas adicionales, se debe medir la distancia desde la entrada de la cavidad (punto A) hasta la cookie colocada en la línea guía (punto B) y desde ese punto se lanza la línea secundaria hasta la ubicación de los restos (punto C). Para obtener la geolocalización exacta de los mismos se necesita conocer la distancia entre B y C, la profundidad de ambos puntos y el acimut o rumbo de ambas líneas (A y B) y (B y C). Gracias a ello se puede calcular el ángulo de la línea secundaria respecto a la primaria para una posterior geo posición sobre un mapa SIG (Fig. 17.2).

### 5.6.1.3. *Prospección lineal terciaria*

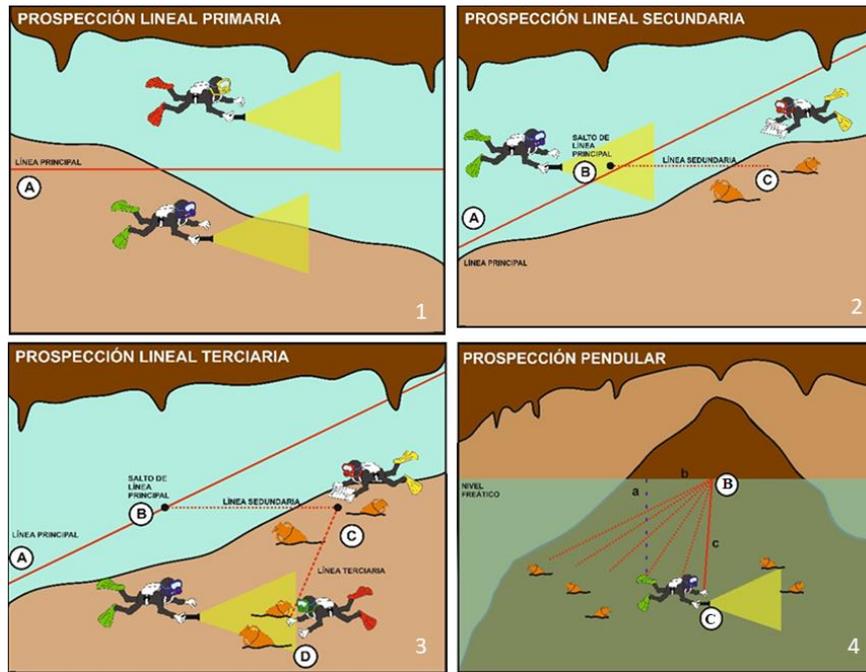
En ocasiones la localización de los restos arqueológicos o paleontológicos se complica aún más, debido a la compleja ubicación de éstos dentro de la cavidad, ya sea porque éstos se encuentran en salas colindantes a la galería principal, porque están en profundidades distintas a la línea guía o porque entre la línea principal y el yacimiento hay obstáculos importantes a salvar.

En estos casos se realiza la prospección lineal terciaria donde una vez conocida la distancia entre los puntos (A y B) y (B y C) con sus respectivas profundidades y rumbos, se calcula una tercera línea (C y D), la cual va desde el punto C hasta los restos arqueológicos o punto D. En este último punto, de igual modo, se debe calcular acimut y profundidad (Fig. 17.3). Una vez registrado el punto se deben documentar los restos a través de fotografía, dibujo arqueológico o fotogrametría.

### 5.6.1.4. *Prospección visual pendular*

Las características específicas de algunas cavidades hacen que los restos arqueológicos se encuentren en zonas de derrumbes, cámaras de colapso o pendientes de acceso a antiguas entradas, actualmente cegadas. En este tipo de ubicaciones la prospección más efectiva es la pendular. Desde un punto ubicado en la línea guía (punto B) se realizan barridos en zigzag aumentando progresivamente la profundidad y el radio de la semicircunferencia. Una vez localizados los restos se calcula la distancia entre el punto A, en la entrada de la cavidad, hasta el punto B, ubicado en la línea (línea A-B), para posteriormente medir la profundidad y la distancia desde el punto B hasta el punto C (línea B-C).

De este modo, a través de la fórmula de Pitágoras se calcula el último cateto del triángulo (cateto B) para poder geo posicionar sobre plano los restos del yacimiento, ya que conocemos la profundidad (cateto A) y la hipotenusa (línea B-C) (Fig. 17.4).



**Figura 17.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal primaria. **1.** Esquema de la prospección lineal primaria. **2.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal secundaria. **3.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal terciaria. **4.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal pendular. (Autor; Antonio J. Talavera).

### 5.6.2. Aplicación de la radiolocalización en la prospección arqueológica subacuática en cuevas sumergidas

Una de las necesidades más importantes, tanto en la fase de registro topográfico como documental, es la obtención de un geoposicionamiento concreto del yacimiento sumergido, y para ello una de las herramientas de gran utilidad son los sistemas de radiolocalización, los cuales se basan en aplicaciones radio goniométricas, es decir, mediciones de ángulos a través de ondas de radio. Estos ángulos, apoyados por medidas de distancias en superficie y, aplicaciones trigonométricas, nos dejan reflejado un punto en superficie junto con su profundidad, desde el interior de la cavidad al exterior.

En líneas generales, el sistema empleado consta de una baliza emisora, la cual, es introducida en la cavidad. Ésta emite una señal electromagnética hacia el exterior, donde es recibida por un receptor en superficie. Ambos equipos, emisor y

receptor, constan de antenas directivas, las cuales, según su orientación entre las mismas, nos proporcionan los ángulos de interés. Las antenas están concebidas para trabajar con la componente magnética del campo electromagnético creado, ya que es el menos atenuado a la hora de atravesar el paquete rocoso. La componente eléctrica se desvanece significativamente a unos pocos metros.

#### 5.6.2.1. *Objetivos de esta metodología*

El objetivo de la radiolocalización tiene como fin principal dejar ubicado en superficie la vertical donde se encuentra el equipo emisor del interior de cavidad, por ser un punto de interés. Para ello, se procede a introducir el equipo emisor sumergible correctamente nivelado en un punto concreto, que suele ser georreferenciado a una línea guía, para su posterior comparativa. Posteriormente, el equipo receptor de superficie se ubica en una zona estimada, donde se está a la espera de dicha señal. Una vez detectada la señal, se procede a apuntar con la antena en posición de medición de ángulos de rumbo, que nos trazan una dirección concreta en la que la señal es nula. Se hace así, porque es más fácil discernir ante el máximo de señal, que es más ambiguo. La señal recibida es un tono audible a través de un altavoz o auriculares conectados al receptor. Se repite la medición desde varios puntos, observando donde cruzan dichas direcciones de rumbo en un punto concreto, dejando fijado ese punto como “zona cero”, que es la vertical en la que se encuentra el emisor.

Dependiendo de la intensidad de la señal recibida, esas direcciones no se cruzan en un punto exacto, reflejando entonces tres mediciones, es decir una incertidumbre denominada “triángulo de error”, cuyo baricentro es dicha zona cero. Para averiguar la profundidad, se pasa la antena del receptor a la posición para medir ángulos de inclinación, girando ésta 90°. Desde varios puntos de referencia, retirados y medidos respecto de la zona cero, se toman dichos ángulos. Con un lado del triángulo rectángulo y un ángulo, ya se pueden determinar el resto por trigonometría, siendo de interés el lado que corresponde a la profundidad (Smith, 2013; Leandro y Díez de la Rubia, 2017; Leandro Ronda *et al.*, 2021).

La precisión de estos métodos está condicionada por diferentes afecciones que pueden variar el error medido, como son; una intensidad débil de la señal recibida, el ruido generado por interferencias de campos electromagnéticos cercanos, la anisotropía<sup>28</sup> del terreno, el ruido de banda generado en diferentes horas del día o las descargas atmosféricas. Este conjunto de afecciones determina el tamaño del triángulo de error (Leandro y Díez de la Rubia, 2017).

#### 5.6.2.2. El dispositivo PINGER

El diseño del PINGER fue creado por el espeleo buceador australiano Ken Smith como un dispositivo que realiza las funciones de un transmisor de radiolocalización, pequeño y fácil de llevar para un buceador. Esto llevó al concepto de un pequeño transmisor cilíndrico que podía flotar y operar en el techo de la cueva, alejándose de los suelos de limo (Smith, 2013) (Fig. 18.1).

Una característica clave del transmisor PINGER es el uso de un núcleo de alta permeabilidad magnética para reducir el tamaño de la bobina. *“El transmisor utiliza un núcleo de metal laminado y una bobina larga y delgada. Esta bobina junto con la electrónica y las baterías del controlador se insertan en un tubo de PVC de 600 mm de longitud y 50 mm de diámetro. El tubo está sellado permanentemente en un extremo con un anillo roscado. El transmisor tiene una ligera flotabilidad positiva, por lo que puede flotar en posición vertical en el agua, lo que permite la orientación correcta del campo magnético”*(Smith, 2013).

*“El emisor o transmisor de la bobina de la antena contiene un núcleo de MU-M ETA que se compone de una banda MU, de aproximadamente 12,7 mm (1/2 pulgadas) de ancho y aproximadamente 0,055 mm (0,0022 pulgadas) de espesor. La batería tiene un espesor de 6 mm y pesa 175 gramos. Un solo oscilador proporciona una señal de 1,16 kHz y esto se amplifica mediante un amplificador de audio de un solo chip que a la vez alimenta una bobina del controlador a la bobina del transmisor. Ocho células alcalinas tipo C proporcionan la fuente de*

---

<sup>28</sup> Un material anisotrópico es aquel que presenta propiedades mecánicas, como lo son la resistencia, rigidez y la permeabilidad, que dependen de la dirección relativa a la dirección de sedimentación. Este efecto se observa principalmente en las arcillas, debido a que presentan una estructura laminar.

*alimentación requerida de 12 voltios. El flujo de corriente de transmisión continua es de aproximadamente 70 MA con una duración de la batería de 24 horas” (Smith, 2013).*

*“El receptor utiliza una antena de bucle cilíndrico, similar a la utilizada por el transmisor, sintonizada para ponerla en la misma frecuencia. La señal de la bobina del receptor se amplifica mediante un preamplificador y un amplificador de audio que la transmite a los auriculares. La bobina del receptor está montada en un tubo de PVC. El tubo está equipado con dos niveles de burbuja. Uno indica cuando la bobina está en horizontal, para la ubicación del punto del PINGER y el otro indica cuando el eje de la bobina está a 45°, lo que permite una medición de la profundidad. En lugares remotos, sin interferencias eléctricas, el silbido distintivo del emisor se puede escuchar a una distancia de hasta 130 m con el receptor” (Smith, 2018).*

*“El receptor está construido sobre dos tableros colocados a una cierta distancia para reducir la retroalimentación. El preamplificador va montado en la misma carcasa que la bobina y el amplificador con auriculares va montado en una caja estanca en la cintura del operador. Por último, un cable de un metro de longitud conecta la bobina del amplificador al receptor” (Smith, 2013).*

#### *5.6.2.2.1. Uso del PINGER*

En su uso el espeleo-buceador coloca el PINGER en el techo en un lugar específico siendo necesario medir la profundidad del techo y del suelo en ese punto, aunque para encontrar el mismo punto en la superficie se deberá tener una idea razonable de dónde encontrarlo. El emisor de radiolocalización se puede escuchar fácilmente en un radio de 100 metros (Smith, 2019) (Fig. 18.1).

El PINGER se puede escuchar fácilmente en un radio de 100 metros. Con un poco de experiencia se puede utilizar la orientación del campo magnético para encontrar la ubicación del emisor con bastante rapidez (Fig. 18.2.). Una vez que se encuentra la señal, la antena del receptor debe mantenerse horizontalmente utilizando para ello la burbuja de nivel, girándola alrededor de su eje vertical hasta

que no se oiga ninguna señal. Cuando la señal se anula significa que nos encontramos en la zona cero (el punto de superficie ubicado exactamente encima del transmisor subterráneo) por lo tanto se encuentra en un ángulo recto a la antena de recepción. Una vez hecho esto, tendremos que movernos a otro lugar donde se pueda escuchar la señal y el procedimiento se pueda realizar de nuevo. Después de repetir este procedimiento en un mínimo de dos ubicaciones diferentes, ya se habrá estimado una posición aproximada de la zona cero. La posición final de la zona cero se confirma manteniendo la antena del receptor horizontalmente en esta posición y girándola alrededor de su eje vertical.

Finalmente, se debe señalar la zona cero con una roca o estaca mientras nos alejamos de esa ubicación con el extremo de la antena del receptor apuntando hacia la zona cero, en un ángulo de 45°. Nos detendremos en el punto donde se cancela la señal y mediremos la distancia a la zona cero. Mientras el suelo sea horizontal, la profundidad del transmisor subterráneo será de 1,77 veces la distancia a cero. El sistema PINGER está limitado por las posibles interferencias generales. En las zonas urbanizadas cercanas la potencia está limitada de 20 a 30 metros (Smith, 2018)

Actualmente los sistemas de radiolocalización con PINGER son los más fiables siempre y cuando entre el receptor en la superficie y el emisor sumergido no tengan más de 100 metros de distancia entre ellos, ya que por ahora la señal no consigue atravesar tantos metros de roca entre el receptor y el emisor.

#### *5.6.2.3. El Sistema de radiolocalización SUMMER*

Otro de los sistemas de radiolocalización utilizados en nuestro estudio ha sido el dispositivo SUMMER que fue inventado por el técnico electrónico Juan Leandro y consta de un equipo emisor, denominado SUMMER, en el interior de la cavidad que radia una onda electromagnética de baja frecuencia LF y, atraviesa (sólo la componente magnética) el paquete rocoso hasta la superficie, donde otro equipo con un receptor, denominado WINTER, con antena directiva recoge esa señal que, mediante técnicas radio goniométricas (medición de ángulos a través de ondas de

radio) refleja en superficie la vertical del equipo interior y su profundidad (Leandro y Díez de la Rubia, 2017; Leandro Ronda *et al.*, 2021) (Fig. 19.2).

Durante los trabajos desarrollados por la asociación EXTPOCIEN, creada para la realización de estudios y publicaciones del sistema de la cueva de los Chorros, Riopar (Albacete), surgió la necesidad de fabricar un emisor para el uso de radiolocalización, con prestaciones sumergibles y, una utilidad añadida de comunicación de mensajes de texto a modo de baliza, que se denomina SUMMER (Fig. 18.3). Seguidamente, se procedió a realizar un receptor de la señal del SUMMER para procesar, mediante técnicas radio-goniométricas, la radiolocalización de ésta en superficie. Además, este receptor recibe también la información de texto, a través de código morse automático, generado por dispositivo móvil/Tablet/PC desde el SUMMER, vía bluetooth o alámbrica, descodificándolo mediante otro móvil insertado en el mismo receptor, denominado WINTER (Fig. 19.4). Estos equipos son prototipos en continua evolución y no están destinados para uso comercial (Leandro Ronda *et al.*, 2021).

#### 5.6.2.3.1. El proceso de toma de datos

En primer lugar, se establece en superficie, la zona estimada del punto del interior de la cavidad, normalmente desde el punto de la boca trasladado en coordenadas, si es posible. Esto es lo más importante cuando se prevé que la señal puede ser débil por el gran paquete rocoso, puesto que se correría el riesgo de incertidumbre de saber si la señal está o no presente. Se establecerá una hora de conexión más un tiempo de duración, para dar el tiempo suficiente para la toma de datos. Una vez situados en la zona estimada para realizar la radiolocalización, se conecta el receptor WINTER con la ganancia en manual al máximo, con el receptor sin trípode, y con la antena horizontal con rumbo de 180°, buscando la dirección donde se anula la señal recibida del emisor. Una vez determinado el rumbo, debemos alejarnos perpendicularmente hacia el lado más cómodo y repetir la operación. Éste nuevo rumbo nos indicará una recta que se cortará con la anterior, y así nos aproximaremos más a la zona llamada “tierra cero” que es la vertical donde se encuentra el emisor en el interior de la cavidad. Una vez acotada la zona

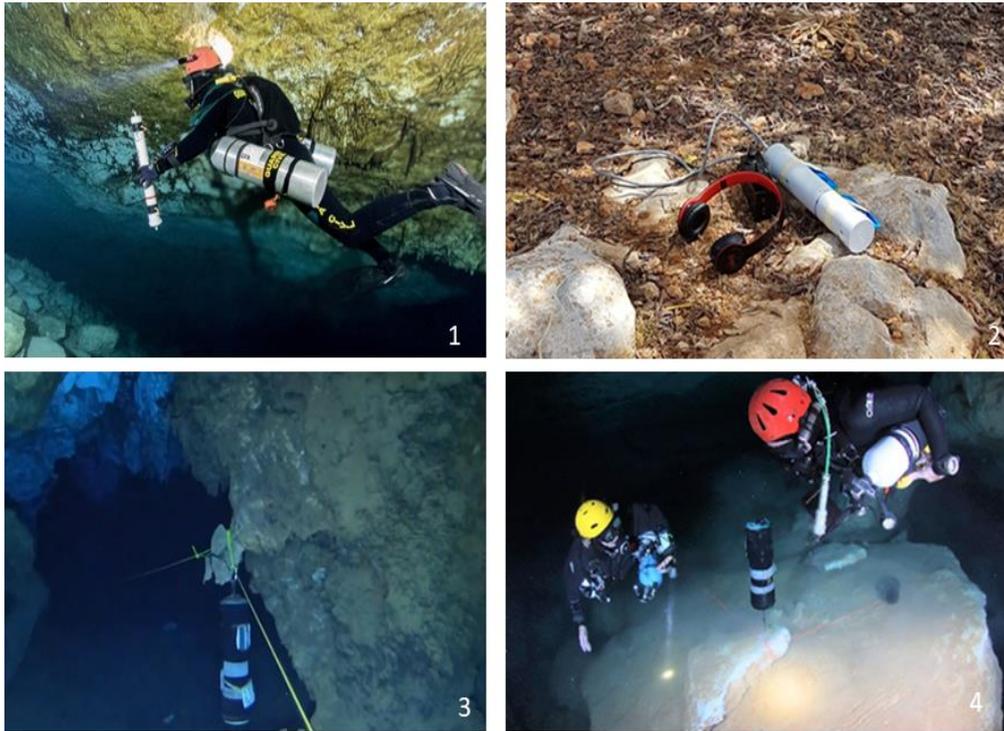
de “tierra cero”, se establecen tres puntos de referencia, cuyos rumbos van a atravesar la zona de “tierra cero”, produciendo un triángulo de error, ya que es difícil que se corten en un mismo punto. Se colocará el receptor en su trípode y desde los puntos de referencia PR, se trazará con líneas guía las rectas que se van a cruzar, ayudándonos de la mira (Fig. 19.3). El baricentro del triángulo es el definitivo punto de tierra cero, procediendo a clavar una estaca identificativa.

Partiendo de que la superficie sea completamente horizontal, se tomarán las tres distancias desde tierra cero a cada uno de los puntos de referencia, mediante una cinta métrica o flexómetro. Si la superficie tiene desniveles se tomará el ángulo de inclinación apuntando a tierra cero desde los tres puntos de referencia (PR), ayudándonos de la mira y el clinómetro. Seguidamente se girará el soporte de la antena 90° quedando vertical, preparado para realizar la lectura de ángulo magnético.

Apuntando desde los PR hacia tierra cero, se buscará de nuevo la señal nula, inclinando el soporte y anotando el ángulo del clinómetro. Este ángulo magnético será convertido a ángulo real mediante la fórmula o el ábaco. Una vez obtenido un ángulo y un lado de un triángulo rectángulo se podrán aplicar fórmulas trigonométricas para obtener la profundidad.

#### 5.6.2.3.2. *El emisor de baliza sumergible SUMMER*

El SUMMER tiene unas dimensiones máximas en su cilindro de 17 cm de diámetro y 49 cm de largo e incorpora un recipiente de caucho para ser transportado por la cavidad (Fig. 18.4 y 19.1). No tiene módulos separados, es un mono bloque y pesa 7.1 kg. Tiene un consumo máximo 5W, no regulable con una alimentación, batería recargable 12V 6800 mAh ion litio con una autonomía, según configuración de hasta 10 horas. Este dispositivo es sumergible a -32 metros durante 48 horas. Tiene una función de auto nivelación cuando queda sustentado en el aire. En el agua son necesarios 1.7 kg de lastre (Fig. 18.3). Además, está adaptado para emitir código morse automático a través de un conector externo alámbrico mediante dispositivos; móvil, PC, Tablet y por su salida de audio (Leandro y Díez de la Rubia, 2017).



**Figura 18.** Ejemplos de la utilización de los dispositivos PINGER y SUMMER. **1.** Miembro de los GEAS extrayendo el dispositivo PINGER en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou en la campaña del año 2019 del Proyecto IASCM (Foto. Florian Huber). **2.** Receptor cilíndrico y auriculares del dispositivo de radiolocalización PINGER utilizados durante la campaña de prospección arqueológica del Proyecto IASCM 20219 (Foto. Autor) **3.** Emisor de radiolocalización SUMMER colocado en una galería sumergida de la cueva de los Chorros, Riopar (Albacete) (Foto. Juan Leandro). **4.** Colocación del emisor SUMMER en la cavidad sumergida de la cova Genovesa durante la campaña de prospección arqueológica del Proyecto IASCM 2020 (Foto. John Kendall).

#### 5.6.2.3.3. *El receptor WINTER*

Está formada por cuatro varillas de ferrita F10100 (10mm de diámetro por 100mm de largo). Tres de ellas están pegadas y bobinadas en su totalidad (hilo de 0.2mm cuadrados), mientras que la cuarta se utiliza para realizar una sintonía por permeabilidad magnética, separándose del resto por una pieza roscada, consiguiendo un ajuste fino de sintonía. La ferrita es susceptible a cambios de temperatura. Un ajuste grueso se consigue con la conmutación del condensador de

sintonía, realizado en doce pasos para obtener una gran excursión de frecuencia (Fig. 19.2).

La frecuencia de resonancia son 38400 Hz y su ancho de banda es de 200 Hz que, junto las tres etapas de filtraje de la sintonía frontal, produce un fuerte rechazo de frecuencias indeseables, como es el caso de una señal de 37500 Hz dirección E-W de emisión continua. Se usa la ferrita por su bajo coste y facilidad de consecución. En la caja de conexión se encuentra la etapa de la sintonía frontal más su ajuste grueso. Lleva dos niveles de burbuja para controlar los ejes del plano. La antena queda mecanizada a 90° respecto al soporte del conjunto, en el que van ubicados los instrumentos de rumbo e inclinación. El centro de la antena tiene incorporado un orificio para trazar una plomada, donde ubicar la estaca del punto de referencia<sup>29</sup>. Su longitud es de 43cm (Leandro y Díez de la Rubia, 2017; Leandro Ronda *et al.*, 2021).

#### 5.6.2.3.4. El dispositivo móvil

El dispositivo móvil incorporado al receptor es un móvil Samsung sin tarjeta SIM de telefonía, el cual, se le extraen los terminales de batería para alimentarlo externamente por medio del conector micro USB (Fig. 19.4). Con el conector de auriculares, se extrae salida y entrada de audio, ésta última por medio del micrófono externo. Su función principal es una aplicación que decodifica el código morse automático "*morse code reader*". El resto de las aplicaciones son utilizadas como: lector de inclinación, analizadores de espectro, brújula, coordenadas GPS, grabador de audio, captura de pantallas, grabación de mensajes recibidos, cámara de fotos y video frontal, calculadora científica, unidad almacenamiento de datos, y múltiples aplicaciones más. Otra aplicación importante es "*morse player free*", que permite a través de bluetooth emitir código morse automático hacia la baliza SUMMER, quedando establecido un transceptor de una forma práctica y sencilla (Leandro y Díez de la Rubia, 2017) (Fig. 19.4).

---

<sup>29</sup> La BCRA (asociación británica de investigación en cavidades) publica una revista trimestral, es el CREG Journal (cave radio & electronics group). Están los artículos del Summer y del Winter publicados, por resultar de interés para el colectivo espeleológico.

La metodología prospectiva en cuevas sumergidas, dentro de los sistemas de topografía subacuática que existen hoy en día, encuentran en la radiolocalización un método alternativo para corroborar la posible acumulación de errores provocados por las tolerancias de éstos, ya que, como todos los aparatos destinados a medición, conllevan una determinada precisión. Es por ello por lo que, aun siendo un sistema en el que la precisión es relativa en función de varios condicionantes, es un método fiable en comparativa a las posibles distancias erradas, sobre todo si no es una poligonal cerrada donde se puedan establecer una corrección compensada (Fumás, 2022b).



**Figura 19.** Diferentes partes del emisor y receptor de radiolocalización; **1.** Imagen de los diferentes módulos de la baliza de radiolocalización SUMMER utilizado en la presente investigación. Fuente; (Leandro y Díez de la Rubia, 2017). **2.** Imagen detallada de cada uno de los componentes que forman parte del receptor WINTER creado por Juan Leandro. Fuente; (Leandro y Díez de la Rubia, 2017). **3.** Imagen del receptor WINTER durante la recepción de la señal del emisor SUMMER en la cova del Sistema Sa Gleda- Camps des Pou en Mallorca durante la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM (Foto. Autor). **4.** Detalle del dispositivo móvil ubicado en la consola de control del dispositivo receptor WINTER. Fuente; (Leandro y Díez de la Rubia, 2017).

### **5.6.3. El geoposicionamiento con GPS diferencial**

Los métodos mencionados anteriormente deben ser completados con una observación de coordenadas por metodología GPS o clásica (estación total provista de dispositivo GPS o mediante triangulación a punto geodésico disponible). La toma de las coordenadas se deberá tomar en ubicaciones no sumergidas, justo donde arrancan las poligonales o redes trigonométricas que sirvan de inicio o fin del cálculo de las coordenadas precisas, que ubiquen y georreferencien los yacimientos encontrados desde su inicio.

Todo cálculo que se realice y omita unas coordenadas exactas en los puntos de inicio de lectura de los dispositivos con los que prospectar podría considerarse poco riguroso dentro de una tolerancia topográfica viable. Es por eso por lo que se crea la necesidad, tras la observación de experiencias en las campañas realizadas, de una recepción y acopio de toma de datos en campo para el cálculo de errores, mediante el uso de la teoría de errores y de los valores más probables de las coordenadas finales, de los puntos que definan el recorrido subacuático, así como cálculo de la bondad de las observaciones (precisiones finales y elipses de error) (Fernández, 2008; Pachas, 2009; Davila y Camacho, 2012).

### **5.6.4. Métodos y objetivos de la topografía interna**

Uno de los mayores objetivos y retos en el estudio topográfico interno de una cavidad sumergida es el rigor de las mediciones efectuadas, entendidas éstas como comparables o cotejables entre diferentes métodos de medición, ya que hasta hace pocos años la brújula, el profundímetro y el flexómetro eran los utensilios más utilizados para conseguir una topografía aproximada a la realidad (Bellet, 1957; García, 2014). Según el grado de tolerancia topográfica asumible, es decir del grado de precisión en las mediciones tomadas en el estudio prospectivo se realizan un tipo de publicación u otra, lo cual demuestra que a medida que se avanza en las técnicas topográficas, con la utilización de nuevos dispositivos, las cartografías y topografías antiguas quedan superadas. La llegada de nuevos dispositivos electrónicos de mapeo por hilo reducen considerablemente esa tolerancia

topográfica, lo cual mejora considerablemente el geoposicionamiento de puntos de interés concretos en el interior de las cavidades sumergidas (Fumás, 2022a, 2022b).

#### 5.6.4.1. El mapeo por hilo con el dispositivo MNEMO

MNEMO<sup>30</sup> es un dispositivo comercial de prospección por línea, inventado por Sebastien Kister que es capaz de realizar un mapeo de la cueva a través del seguimiento del hilo que sirve a los espeleo-buceadores para guiarse dentro de la cavidad. *“Con un peso de 540 gramos, una flotabilidad en agua dulce de 50 gramos y un tamaño de 13x10x5cm este dispositivo hecho con Acetal, politetrafluoroetileno, acrilonitrilo butadieno estireno y resina de epoxi cristalina puede alcanzar una profundidad de 130 m, por lo tanto, son necesario requisitos de la línea colocada en la cueva para que el dispositivo funciones correctamente, como un grosor de línea de entre 1 a 5 mm, nudos en ella menores de 5 mm y una tensión mínima de al menos 5 newtons. Gracias a sus sensores de altimetría de alta resolución con compensación de temperatura, el aparato puede hacer un cálculo exacto de la profundidad a la que está trabajando. La longitud se calcula gracias a un detector óptico infrarrojo del codificador de cuadratura y el rumbo e inclinación se calculan a través de un sensor inteligente de orientación de 9 ejes, con compensación de hierro duro y suave con interpolación en los encabezados de referencia. A todo esto, hay que añadir una memoria para aproximadamente 5000 disparos y una batería reemplazable de fábrica retráctil de iones de litio de 400 mAh que puede lograr alrededor de 10h de espera, lectura de 5 horas y 2 meses en modo suspensión”*(Kister, 2017).

Es decir, el dispositivo MNEMO registra la longitud, el ángulo de profundidad, la inclinación y el acimut del segmento de la línea a medir al principio y al final de la lectura o medición. La utilización de este dispositivo requiere tener una

---

<sup>30</sup> Información técnica extraída de <http://arianesline.azurewebsites.net/Home/Mnemo>

flotabilidad excepcional, una experiencia considerable en espeleobuceo y una habilidad óptima en la calibración y posterior paso por la línea guía.

Para conseguir resultados validos en la lectura del MNEMO la mano del espeleobuceador no debe ejercer ningún tipo de presión ni al principio ni al final de la lectura, lo cual modificaría el acimut (Fig. 20.1). Una vez hecho esto, durante la medición del segmento el dispositivo deja de medir el acimut y se centra solo en medir la distancia en metros, haciendo que la lectura no sufra modificaciones por larga que sea la línea. Por otro lado, es necesario repetir distintas veces la medición de la línea, hacia un sentido como en otro, para conseguir la superposición de éstas en el programa ARIANE y, así finalmente, determinar si los datos son correctos para validar la sección topográfica.

Los datos recopilados se transmiten a través de un cable USB al ordenador para integrarlos en su programa de software en línea ARIANE, el cual los interpreta y los transporta a un mapa geográfico para finalmente, una vez introducida la fecha, realizar una corrección automática de la declinación magnética de la lectura.

La suma de cada uno de estas lecturas o disparos nos calculará el computo de datos de la línea que, posteriormente, deberán ser superpuestos sobre un plano geográfico u ortofotomapa. Finalmente se introducen los datos del dispositivo en el software mencionado y se introduce una coordenada de entrada a la cueva. Una vez hecho esto el software es capaz de calcular la línea sobre un plano geográfico.

La utilización de esta técnica topográfica en la prospección arqueológica es perfectamente útil y extrapolable a otros ambientes confinados puesto que, en nuestro caso, muchos de los restos arqueológicos se encuentran a centenares de metros de la entrada de la cueva (Kister, 2017).

El uso del dispositivo MNEMO es común en la realización de topografías en cavidades sumergidas por los espeleo-buceadores deportivos debido a su alto grado de fiabilidad.

#### 5.6.4.2. El sistema de registro y navegación subacuática ENC2 de SEACRAFT

La ENC2 de SEACRAFT consta de una consola de navegación electrónica que se coloca en la parte superior del escúter de aluminio del espeleo-buceador, siendo capaz de registrar la ruta dentro de la cavidad sumergida directamente en 3D, midiendo la distancia en todo momento y permitiendo al usuario volver al punto de partida si es necesario (Fig. 20.2).

El dispositivo de navegación ENC2 tiene varios sensores como un magnetómetro 3D, giroscopios 3D, acelerómetro 3D, sensor de presión, sensor de temperatura, módulo GPS (GPS, GLON, Beidou). Su consola cuenta con una serie de características adicionales que permiten orientar al espeleo-buceador dentro de la cueva, informando en todo momento de los parámetros básicos de inmersión, como la profundidad, el rumbo, el tiempo de inmersión y la temperatura del agua.

La consola ENC2 es un sofisticado dispositivo de nivel profesional, con un material de aleación de aluminio de alta calidad resistente al impacto, probado a una profundidad de 350 m. El dispositivo debe colocarse al menos 0.2 m (7,9 ") de cualquier elemento que contenga material ferromagnético (núcleo del motor, batería) o imanes permanentes (manijas del vehículo, sensor de velocidad) porque si no las indicaciones de la brújula pueden ser incorrectas por la presencia de otros campos electromagnéticos<sup>31</sup> (Guía ENC, 2019).

Al igual que el sistema de mapeo por hilo del MNEMO, el ENC2 de SEACRAFT también utiliza el software ARIANE para introducir los datos recopilados y moverlos a un mapa geográfico o sistema de información geográfica (SIG). Las medidas registradas en el interior de la cueva sumergida por este sistema deben tener siempre un punto de referencia o una coordenada concreta en el exterior, en nuestro caso la entrada de la cavidad, para que el aparato pueda detectar las señales de los satélites, ya que en el interior no existe señal.

El método de registro del ENC2 es sin duda la herramienta que permite la prospección y la topografía de la cueva de la forma más rápida puesto que su montaje sobre un propulsor mecánico o escúter minimiza el tiempo de inmersión

---

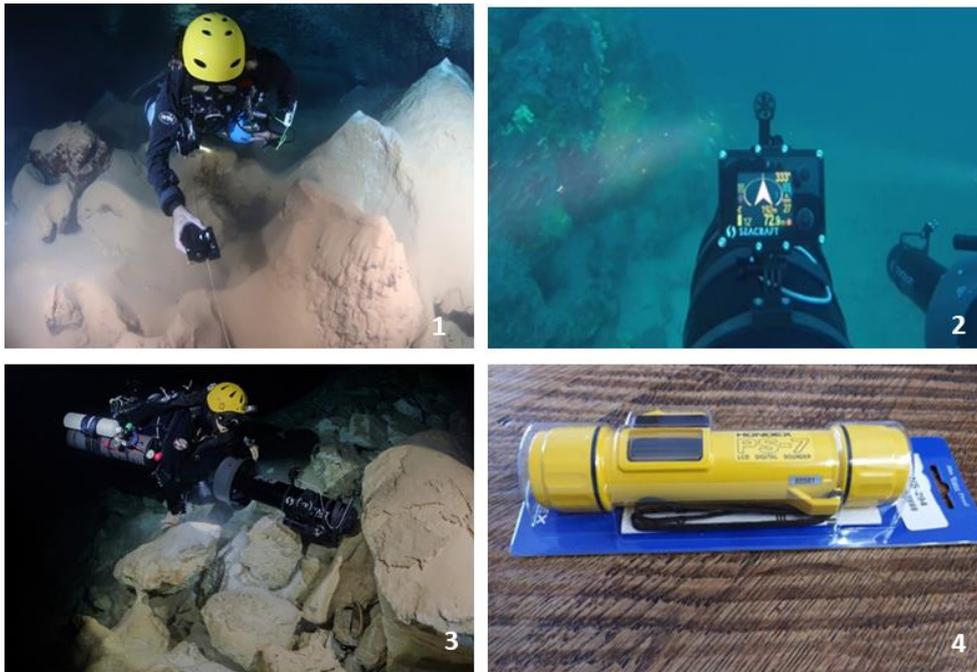
<sup>31</sup> Información extraída del Manual rápido de usuario v.2 Guía ENC, revisión de documentos 1.2 Copyright de Marina Tech SA.

y aumenta las distancias medibles (Fig. 20.3). Los inconvenientes se presentan en el momento de la planificación previa a la inmersión en largas distancias puesto que, a fin de evitar las interferencias en la lectura del aparato, éste no debe tener ningún elemento metálico a su alrededor. Para tal fin es recomendable que el espeleo-buceador utilice sistemas de respiración con reciclador de aire lateral, para evitar problemas en el paso de restricciones de paso y botellas de aluminio de repuesto en el caso de fallo tanto del reciclador como del propulsor (Fumás, 2022b).

#### 5.6.4.3. *La medición por ecosonda manual*

Un método alternativo para la consecución en la medición de distancias es el uso de un ecosonda manual. En nuestro caso utilizamos el ecosonda Hondex PS 7 sumergible hasta 50 metros y con un alcance de 80 metros. El dispositivo tiene unas dimensiones: 42 mm de diámetro y 198mm de longitud y cuenta con una pantalla LCD de 7 segmentos con una frecuencia de 200 KHz (haz de 24°). Dispone de desconexión automática a los 210 segundos. La duración de la pila es de 500 activaciones. Tiene un peso de 190 gramos con la pila incluida (Fig. 20.4).

El ecosonda es capaz de lanzar un haz acústico que calcula la distancia de las diferentes mediciones radiales tomando como puntos guía los diferentes segmentos de hilo. La medición de estas radiales crea una malla 3D de la cavidad al introducir los datos en el software MATLAB (Gerovasileiou *et al.*, 2013).



**Figura 20.** Distintos ejemplos de topografía interna. **1.** Dispositivo de mapeo por hilo MNEMO utilizado por el Dr. Javier Lario en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. (Foto. John Kendall). **2.** Imagen de la consola GPS ENC2 de SEACRAFT montada sobre un escúter de aluminio. Fuente; (Guía ENC, 2019). **3.** Dispositivo ENC2 de SEACRAFT señalizando el punto donde se encuentran restos de cerámica sumergida en la cova del Sistema Sa Gleda-Camps des Pou. Campaña 2019 del Proyecto IASCM. (Foto. Miguel Á. Perelló). **4.** Imagen del ecosonda Hondex PS-7 utilizada en las mediciones radiales en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. (Foto. Autor).

#### 5.6.4.4. Uso de vehículos sumergibles autónomos AUV

El uso de los vehículos autónomos subacuáticos (AUV) es una técnica poco usual en el estudio de cavidades sumergidas, debido a la complejidad de su uso dentro de estos ambientes confinados. Los AUV llevan a cabo sus misiones sin la intervención del operador, completando su trabajo al regresar a una ubicación preprogramada donde los datos se descargan y se procesan los datos obtenidos. Desde hace unos años se está experimentando con los AUV de un modo notorio y progresivo con la introducción de esta tecnología en proyectos como; el Proyecto DEPTHX en la exploración de los cenotes inundados en México (Kantor *et al.*, 2008), el Proyecto UXNEXMIN basado en el empleo de un AUV con un sonar multihaz en las minas sumergidas de Kaatiala (Finlandia) y de Idrija (Eslovenia)

(Martins *et al.*, 2018) o en la creación de imágenes tridimensionales en cuevas sumergidas, al utilizar un mono láser, junto con espejos convexos y sensores CCD sobre un AUV (Wambold *et al.*, 2006). Actualmente, se ha desarrollado un AUV autónomo denominado SUNFISH<sup>32</sup> capaz de tomar sus propias decisiones más allá de las misiones programadas. Además, es capaz de realizar tareas de exploración en entornos complejos y extremos y encontrar el camino de retorno de forma autónoma mientras obtiene imágenes detalladas, perfiles químicos y mapas de sonar del área explorada (Richmond *et al.*, 2020). De este modo, vistos los precedentes en este tipo de prospecciones, se decidió apostar por la introducción de un AUV con una sonda multihaz en el Proyecto Falconera, el cual desarrollaremos en el apartado siguiente, como método más eficaz en la consecución de datos (Fig. 21.1).

Los sistemas de multihaz utilizan ecosondas cuyos transductores emiten simultáneamente un abanico de ondas acústicas. Estas ondas chocan en el fondo y en las paredes, lo cual provoca un rebote y un eco que es detectado por el receptor, pudiéndose repetir este proceso hasta 100 veces por segundo. En nuestro estudio, la búsqueda de una localización de resguardo arqueológico concreta en la cova de la Falconera, ubicada en la localidad de Garraf en Barcelona, creó la necesidad de utilizar una herramienta de mapeo 3D que generara toda la información de la volumetría de la parte de la cavidad a estudio.

#### **5.6.5. Objetivos y métodos directos aplicados a la documentación arqueológica subacuática**

Dentro de la segunda fase prospectiva o fase documental, dentro de los denominados métodos directos, encontramos las técnicas fotográficas y audiovisuales para el registro de los datos obtenidos. Aunque, todavía hay estudios arqueológicos donde se utiliza el fotomosaico como herramienta de documentación y geoposicionamiento espacial (García, 2014), en la actualidad las técnicas fotogramétricas están mucho más desarrolladas consiguiendo una optimización del registro arqueológico sin apenas inmersiones (Yamafune, 2016;

---

<sup>32</sup> <https://sunfishinc.com/>

Mayoral, 2017; Moya y Muñoz, 2017). En nuestro caso, la técnica que más se empleó fue la fotogrametría ya que la generación de un modelo 3D fotogramétrico, escalado y orientado era una premisa fundamental en nuestra investigación arqueológica, ya que esto permitía alcanzar los objetivos propuestos de una manera más rápida, efectiva y rigurosa. Para conseguir extraer la máxima información posible era necesario fotografiar cada una de las piezas o evidencia arqueológica de cada yacimiento, de modo que en cada captura se pudiera apreciar su perspectiva frontal, tal y como sugieren los criterios de dibujo cerámico, lo cual nos permitiría su clasificación tipológica (Figs. 21.2 y 21.3). Además, todas las fotografías se debían realizar junto a escalas para conocer las dimensiones de la pieza, así como una flecha Norte, la cual siempre nos indicaría el norte magnético y la orientación de la pieza y el modelo. Ya, para su posterior clasificación, también se incluirán capturas de los objetos junto a sus datos arqueológicos (sigla, clase cerámica, tipo, etc.) (Fig. 21.4).



**Figura 21.** Equipos y ejemplos de metodología de registro utilizados. **1.** El AUV SPARUS II en las instalaciones del Centro de Investigación de Robótica Submarina (CIRS) de la Universidad de Girona (Foto. Autor). **2.** Equipo fotográfico de última generación para la captura de imágenes en la cova de la Font de Ses Aiguades (Proyecto IASCM 2020) (Foto. Autor). **3.** Imagen de la captura fotográfica de los restos óseos del *Myotragus balearicus* en la cova de la Font de Ses Aiguades (Proyecto IASCM 2019) (Foto. Florian Huber). **4.** Escala con orientación al Norte junto a las piezas cerámicas a fotografiar en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Proyecto IASCM 2020). (Foto. John Kendall).

### 5.6.6.1. La fotogrametría como método de documentación

En los últimos años, la proliferación de softwares fotogramétricos ha permitido tener una extraordinaria variedad de recursos metodológicos de registro. En el caso de la arqueología subacuática estas herramientas se pueden aplicar fácilmente a las diferentes tareas del trabajo de campo, tanto durante la excavación como durante la prospección. Estas herramientas obtienen la representación de objetos y lugares, sin ser retirados del agua. Cada vez es más fácil e intuitivo aplicar técnicas de fotogrametría en arqueología ya que las ventajas que ofrecen algunos programas de edición 3D permiten desarrollar tareas altamente complejas (Huber, 2014; Yamafune, 2016; Mayoral, 2017; Moya y Muñoz, 2017). En nuestro caso, los objetivos de la documentación fotogramétrica se veían truncados en ocasiones por las grandes dimensiones del modelo 3D a conseguir, por la dificultad en el acceso y por el sedimento en suspensión. Es por esto por lo que, las dianas fotogramétricas fueron un recurso importante en la consecución de un solapamiento fotográfico correcto. El procedimiento de cualquier proyecto para desarrollar un modelo 3D siempre constará de cuatro fases: I) la captura de fotos, II) la manipulación fotogramétrica, que en nuestro caso se realizó con el software Agisoft Metashape Professional (Fig. 22), III) la perfección de la malla 3D con el software Meshlab o Blender, si es necesario, y, IV) la generación de los modelos 3D finales en formato PDF utilizando Adobe Reader.



**Figura 22.** Ejemplo de las distintas fases del procesado fotogramétrico de un ánfora con el software Agisoft Metashape Professional. Fuente; (Moya y Muñoz, 2017).

#### 5.6.6.1.1. *El modelado digital 3D*

El primer paso para generar un modelo 3D, es crear una colección de fotos que se lleven a cabo por una serie de reglas, siguiendo el patrón que establece la metodología fotogramétrica y el comportamiento del software que seleccionemos como segundo paso. Anteriormente, debemos tener en cuenta qué tipo de proyecto queremos desarrollar. La estrategia llevada a cabo será diferente si queremos modelar un campo amplio o, si queremos ajustarnos al procesamiento de un solo objeto. La compilación fotográfica es necesaria para la realización de los modelos digitales en 3D y deben completarse siguiendo los pasos establecidos por los criterios técnicos, dedicados a este tipo de metodologías.

Para que el software pueda identificar la ubicación de la imagen, se recomienda seguir un orden al tomar las fotografías. Se recomienda comenzar con la captura cenital y posteriormente continuar con la captura de un contrapicado con un ángulo de inclinación aproximado de 45°. A continuación, se deben capturar planos perpendiculares y concéntricos de toda la superficie del objeto. Siempre que sea posible, también se realizarán fotografías en el plano del objeto en particular. Hay que tener en cuenta las características de cada objeto específico, ya que pueden dificultar la captura de las fotografías indispensables para el modelado digital en 3D. Algunos criterios de peso a valorar son el estado de conservación y la ubicación del objeto (Mayoral, 2017).

En nuestro caso, la captura de imágenes se consiguió de forma fotográfica o videográfica siguiendo el patrón que establecía el posterior modelado digital. Cada modelo fotogramétrico se enfrenta a numerosos inconvenientes en la captura de imágenes, y aún más si la toma se realizaba en ambientes subacuáticos y en espacios con poca movilidad para el buzo.

#### 5.6.6.1.2. *La problemática en la manipulación fotogramétrica*

Después de las pruebas realizadas con diferentes programas, consideramos que el software más adecuado para el tratamiento de la fotogrametría es Agisoft

Metashape Professional<sup>33</sup>. Este programa es el más útil para calcular la superposición de fotos, crear mallas y generar texturas. En nuestro caso, el conjunto de capturas fotográficas se debía introducir de forma ordenada para que el software pudiera alinear las imágenes y crear una malla que representara el objeto fotografiado. Es común que la malla inicial contenga errores y partes sin conectar debido a la mala interpretación del programa, producida por elementos con coloración y morfología variada (Moya y Muñoz, 2017).

A pesar de las muchas virtudes que encontramos en la fotogrametría, la principal limitación viene determinada por las condiciones de visibilidad del área de trabajo, puesto que ésta es una técnica que depende en gran medida de la captura fotográfica, con lo cual, la visibilidad siempre determinará su posible aplicación al registro arqueológico del yacimiento (Domínguez, Fernández Matallana y Casaban Banaclocha, 2013).

Sin embargo, el mayor problema en el uso de la fotogrametría consiste en la reconstrucción de la posición de un par de fotografías tal y como se hicieron en el momento de la toma, para así, por analogía geométrica poder medir coordenadas tridimensionales del terreno capturado (Quirós, 2014). En principio, los datos de partida siempre son dos o más fotografías en formato digital, pero, además, es necesario conseguir las coordenadas reales, mediante la obtención previa de “puntos de apoyo”, con el fin de orientar el trabajo en un sistema de referencia en concreto y obtener una comprobación de éste, es decir, para poder asegurar la calidad del modelo final.

El procedimiento de cualquier proyecto fotogramétrico para desarrollar un modelo 3D georreferenciado a partir de tomas fotográficas consta de 4 fases; I) una orientación interna, mediante la cual se reproduce el haz perspectivo que constituye cada fotografía aisladamente. En esta fase se procede a determinar y aplicar una serie de correcciones que hacen posible pasar de una fotografía a una ortofotografía, lo cual permite realizar las mediciones en la imagen, II) una orientación relativa, mediante la cual se relacionan geoméricamente cada una de las ortofotografías formándose lo que se denomina el modelo estereoscópico. La fase consiste en identificar pares de puntos homólogos en las fotografías con

---

<sup>33</sup> <https://www.agisoft.com/>

recubrimiento común para, posteriormente, reconstruir cada uno de los haces y poder así generar el modelo o ortomosaico fotogramétrico, III) una orientación absoluta, la cual consiste en nivelar el modelo, escalarlo, trasladarlo y orientarlo digitalmente hasta su verdadera posición en el terreno. Para poder realizar este paso se han de conocer al menos las coordenadas terreno de al menos tres puntos en ambos sistemas (modelo, terreno), denominados “puntos de apoyo”, para realizar una transformación de coordenadas y obtener con ello el modelo tridimensional georreferenciado y IV) un procesado del ortomosaico, para generar el modelo tridimensional georreferenciado capaz de ser visualizado y medido por un software especializado, obteniendo con ello un clon del terreno ubicado en su verdadera posición en el espacio (Quirós, 2014).

Además de obtener las tres coordenadas tridimensionales que definen la posición de un punto en el espacio, gracias a la fotogrametría, se obtienen también para cada punto tres coordenadas adicionales más, que tienen que ver con el valor RGB (rojo, verde, azul) de cada punto en el momento de la toma (Dandha *et al.*, 2019). Posteriormente estas coordenadas pueden ser utilizadas con la finalidad de obtener diferentes productos que documentan gráficamente al yacimiento como son los planos cartográficos, modelos digitales tridimensionales u ortofotografías.

#### 5.6.6.2. La fotografía y la filmación en video

La documentación fotográfica y de video con tecnología de alta resolución es el método más rápido y efectivo para registrar y documentar los sitios arqueológicos en cuevas sumergidas. Sin embargo, esto plantea grandes exigencias a los espeleo-buceadores, ya que hay que tener en cuenta una gran cantidad de factores complejos en comparación con la fotografía terrestre. El problema más notorio es que la cámara no se utiliza en el medio para el que fue diseñada originalmente, sino en el agua. El agua tiene un índice de refracción más alto que el aire, lo que provoca un aumento aparente de la distancia focal, que debe ser evitado mediante carcasas estancas especiales para la lente utilizada (generalmente gran angular). La materia en suspensión en el agua restringe notablemente la visibilidad en comparación con el aire, y el agua también absorbe ciertas longitudes de onda de

luz dependiendo de la profundidad de inmersión, por lo que son esenciales las fuentes de luz artificiales en modo de potentes flashes y focos auxiliares (Huber, 2014).

En nuestro caso, a causa de las limitaciones de la visibilidad del agua, la fotogrametría se realizó utilizando una cámara réflex digital Canon 77D, en una carcasa Easydive, La cámara se configuró para tomar imágenes de alta calidad de 24 mp con formato jpg, con una velocidad de obturación, apertura y distancia focal establecidas. La distancia entre la cámara y las superficies del objeto nunca fue superior a 1 metro, siendo habitual la captura a 40 cm de distancia.

## 5.7. LOS MÉTODOS INDIRECTOS O DE MUESTREO APLICADOS EN LA TESIS

Los métodos indirectos, siguiendo con la nomenclatura propuesta por Campbell (Campbell, 2018), son aquellos análisis específicos realizados complementariamente a la prospección, entendidos éstos como una herramienta para la contextualización tanto del ámbito general de estudio del área de intervención como del contexto particular y específico del yacimiento arqueológico sumergido.

Desde hace años la multidisciplinariedad en las investigaciones arqueológicas, gracias a la utilización de ciencias auxiliares, han coexistido y complementado los estudios prospectivos subacuáticos, sobre todo los que focalizan su atención en los naufragios. La arqueometría es una disciplina que se basa en la aplicación de técnicas de análisis físico- químico sobre materiales arqueológicos para la mejora del conocimiento arqueológico e histórico. Ciertas técnicas arqueométricas como la dendrocronología, para la determinación de la edad de las maderas de los navíos, la datación por radiocarbono, el análisis de sedimentos o el análisis de muestras de agua son muy útiles en la arqueología subacuática por la luz que arrojan sus resultados, los cuales ayudan a complementar el conocimiento global del yacimiento (Rocha *et al.*, 2014).

En nuestro caso, los métodos indirectos no han sido el objeto principal de esta tesis, ya que la falta de financiación limitó su desarrollo complementario en los proyectos de investigación. Por otro lado, las muestras recogidas tuvieron como premisa la mejora de la seguridad e higiene del buceador antes de introducirse en el agua, ya que ciertas cavidades presentaban un alto grado de contaminación en su interior, por lo que debía primar la salud e integridad de los miembros del equipo. Es por esto por lo que, aunque fueron pocos los análisis y estudios anexos realizados, las muestras obtenidas ayudaron de forma notoria al entendimiento y contextualización global de los yacimientos.

### **5.7.1. La contextualización espacial territorial**

El primer método indirecto aplicable a nuestro estudio es la contextualización espacial de las cuevas con su entorno más inmediato. Gracias a disciplinas como la denominada “Arqueología del Paisaje”, entendida ésta como la especialidad que trata la interpretación y el conocimiento de los espacios culturizados, el registro y la contextualización arqueológica en un espacio físico a estudio, en nuestro caso las cavidades cársticas sumergidas. Desde esta perspectiva, los paisajes constituyen expresiones culturales, territorios culturizados, vividos y conceptualizados, producto de actividades humanas a lo largo del tiempo y, por tanto, son la expresión de sociedades y procesos históricos que los han configurado.

La aplicación de una contextualización espacial del territorio en nuestra investigación va más allá de una arqueología de asentamientos o de un estudio espacial del asentamiento, ya que tiene como objetivo entender los paisajes culturales en todas sus dimensiones: ambiental y social y humano. La dimensión social y humana del paisaje también incluye diferentes esferas: los asentamientos y dinámicas de la población, las zonas agrícolas, su estructuración y la conceptualización de los espacios como entornos simbólicos (Rodríguez Alcalde, 1995; Criado, 1999; Anschuetz, Wilshusen y Scheick, 2001; García, 2014; Kempf, 2020).

En nuestro caso, la contextualización espacial del área de influencia arqueológica de una cavidad concreta puede ser consultada en distintos tipos de mapas como; los históricos, los municipales, los geográficos, los militares, etc. Una de las páginas web más importante y que facilita más información es la del Instituto Geográfico Nacional<sup>34</sup> (IGN).

### 5.7.2. Prospección aérea con dron

En las últimas décadas el uso del dron está siendo una herramienta auxiliar muy utilizada en arqueología terrestre debido a las múltiples ventajas obtenidas con la fotografía aérea u ortofoto (Acosta y Jiménez, 2013; Sampietro, 2018; Díaz *et al.*, 2019). La fotografía obtenida por este medio sirve como herramienta para comprender la evolución del yacimiento, su contexto paisajístico o su estratigrafía, entre otras muchas. Además, es una demostración gráfica de las evidencias e hipótesis planteadas previamente en las primeras fases de estudio. Con la toma de fotografías a escala microespacial, en vuelos a baja altura, y el uso de programas informáticos especializados se pueden generar fotogrametrías y ortofotografías, con lo que se consigue una evolución en la eficiencia durante el transcurso de la toma de datos y la obtención de planimetrías más realistas que la aportada por la metodología tradicional (Díaz *et al.*, 2019).

Por esta razón, una de las últimas actividades llevadas a cabo, para finalizar los trabajos de prospección y documentación arqueológica, fue la realización de un vuelo con dron para conseguir imágenes que nos permitieran; I) la contextualización territorial y arqueológica de la zona, II) encontrar las vías de acceso terrestre viables para identificar y enumerar las futuras áreas de intervención y III) la captura de imágenes para la difusión pública del proyecto.

En el caso de la prospección llevada a cabo en la cova del Gegant, se valoró la idea de realizar una fotogrametría aérea que complementara la que se realizaron a nivel terrestre y submarino, para así calcular las distancias correctas en el

---

<sup>34</sup> <https://www.ign.es/web/ign/portal>

geoposicionamiento de la cuadrícula sumergida, ya que el análisis fotogramétrico computarizado permite obtener nubes de puntos que sirven para generar una malla 3D de alta resolución, que retiene los datos de los píxeles a los que está asociado cada punto X,Y, y Z. Estos modelos 3D permiten una mejor visualización además de servir como medio visual óptimo para la divulgación científica (Acosta y Jiménez, 2013; Gijón-Yescas *et al.*, 2021).

La fotogrametría aérea junto con la georreferenciación terrestre, submarina y GPS nos debería haber permitido realizar, mediciones mucho más precisas, siempre y cuando tuviéramos como referencia de partida varios puntos topográficos geo posicionados y orientados en el modelo fotogramétrico obtenido (Fumás, 2022b). Además, por otro lado, siempre nos podremos apoyar en los recursos que nos ofrece el contexto espacial territorial (Criado, 1999; Picornell, 2012) consultando en acceso abierto, las ortofotografías del archivo del Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña<sup>35</sup> (ICGC), pudiendo comprobar qué zonas se han visto más influenciadas por los contextos erosivos, por los vertidos o por la erosión de las olas del mar.

### **5.7.3. El análisis del agua de las cavidades sumergidas**

El análisis del agua, tanto químico como biológico, puede responder muchas preguntas tanto metodológicas como históricas de gran relevancia. En primer lugar, dentro del ámbito de la seguridad y la higiene, puede darnos datos de la contaminación del agua, evitando poner en peligro al equipo humano interviniente (Sahuquillo, 2002). Pero, por otro lado, el conocimiento de los factores físicos del agua (conductividad, temperatura y salinidad) permite conocer información sobre el ambiente anaeróbico donde se encuentran los restos arqueológicos a estudio. Por ejemplo, si planteamos la extracción de una pieza arqueológica de madera o de cerámica deberemos saber la composición del agua en la que se ha encontrado

---

<sup>35</sup> <https://www.icgc.cat/es>

durante cientos de años para poder realizar un tratamiento acorde a las características intrínsecas del yacimiento sumergido (Pérez de Andrés, 2003).

Tanto es así que, los materiales inorgánicos, silíceos (piedra, cerámica y vidrio) y metálicos, tienen distintos problemas de alteración. Los materiales silíceos (piedra y cerámica) presentan problemas derivados de su porosidad (absorción de agua y con ella de sales, cristalización o eflorescencia); otros por la erosión, ataque por agentes químicos y por agentes biológicos, rupturas, fisuras, etc. La cerámica en particular puede presentar problemas también por fallos en el proceso de fabricación (cocción) por lo cual se producen alteraciones de color, de superficie, estructurales..., cambios de composición mineralógica y química, fragilidad, etc. Dentro de esta generalización, las variedades de piedra y cerámica, incluso la cerámica vidriada o la porcelana presentan también problemas específicos.

El otro gran grupo de materiales lo constituyen los orgánicos. Estos se caracterizan por estar constituidos por largas moléculas en forma de fibras de polímeros. El tejido animal tiene fibras de proteínas y la vegetal lignina, celulosa, hemicelulosa... Todos ellos tienen en común el ser higroscópicos y anisotrópicos, es decir, tienen propiedades direccionales al estar constituidos por fibras. Esto va a marcar sus alteraciones: rigidez, contracción, pérdida de forma y del grado de humedad, e incluso la desaparición de alguno de sus componentes según el medio en que se encuentren (Pérez de Andrés, 2003).

El conocimiento de todas estas características del agua puede darnos datos objetivos sobre la viabilidad o no de mantener los objetos en las mismas condiciones en las que se encontraban antes de su extracción, valorando la excavación o no en campañas arqueológicas posteriores. Es decir que, tanto los materiales textiles (Bass, 1966a) como los botes de madera más antiguos del hemisferio occidental (Newsom y Purdy, 1990) o el ADN humano (Chatters *et al.*, 2014) tienen unas excelentes propiedades de conservación en las cuevas submarinas, por eso es importante conocer las propiedades del agua de las mismas.

La coyuntura técnica en el interior de las cuevas y la necesidad arqueológica de contextualización histórica de los yacimientos en su interior hacía que tuviéramos que contemplar como viables todas las variables analíticas que se pudieran utilizar

(siempre sin realizar ninguna acción intrusiva) o que ya hubieran sido utilizadas en épocas pretéritas. Por ejemplo, han sido muchas las hipótesis históricas sobre el uso de las cuevas de Mallorca como punto de abastecimiento de agua para consumo humano o como recurso hídrico. Es por esta razón que en el presente estudio se llevaron a cabo análisis químicos con sonda CTD<sup>36</sup> del agua. Estos se realizaron gracias a la utilización de una sonda que permitía la monitorización de medidas de perfil de la conductividad, temperatura, presión, oxígeno disuelto y turbidez, a lo largo de la columna de agua, tanto dulce como salada (Arfib *et al.*, 2016) (Fig. 23).



**Figura 23.** Dispositivo CTD propiedad del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) utilizado en la cova de la Font de Ses Aiguades durante la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM (Foto. Autor).

#### 5.7.2.1. El análisis hidro geoquímico del agua

Para el conocimiento, caracterización y funcionamiento de los acuíferos subterráneos, los métodos hidro geoquímicos e isotópicos ambientales son

---

<sup>36</sup> El CTD es un equipo que registra in situ la conductividad y temperatura del agua, así como la profundidad a la que se encuentra sumergido en cada momento, por lo que se utiliza para realizar perfiles oceanográficos de la columna de agua.

herramientas de gran interés. No obstante, subsisten aspectos que no llegan a dilucidarse bien con el estudio de los componentes disueltos mayoritarios, de los isótopos del agua, de algunas sustancias disueltas, y de la datación derivada de algunos radioisótopos naturales.

La caracterización de sustancias orgánicas disueltas en el agua subterránea es uno de los progresos más notables de la química analítica en las últimas dos décadas. Estas técnicas van dirigidas tanto al estudio de la contaminación antrópica (plaguicidas, productos farmacéuticos, disolventes orgánicos, hidrocarburos, colorantes,) como a los existentes naturalmente y que se incorporan con el proceso de recarga, incluso de recarga en épocas pretéritas cuando se trata de sustancias persistentes, pero sin duda su interés está relacionado con la contaminación de los acuíferos (Sahuquillo, 2002)

En nuestro caso, el estudio hidro geoquímico se llevó a cabo en la cova de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia, Mallorca) dentro del Proyecto IASCM, como método para conocer la calidad del agua actual y conocer las características intrínsecas de la misma.

#### 5.7.2.2. *El análisis biológico del agua*

Los análisis biológicos del agua complementan a los químicos en el estudio bacteriano, centrado principalmente en el cálculo porcentual de coliformes, que son un grupo de bacterias que comprenden todos los bacilos aerobios y anaerobios facultativos, gramnegativos, no esporulados que producen el ácido y gas al fermentar la lactosa. Estos se pueden encontrar estadísticamente en una muestra de agua de 100 cc. y el principal representante de ese grupo de bacterias es el llamado “*Escherichia Coli*”. El agua potable no debe contener microorganismos patogénicos y debe estar libre de bacterias indicadoras de contaminación fecal (Espitia, 2019). El análisis biológico contextualizado en un estudio arqueológico ayuda a comprender si el agua de la cavidad, sobre todo si su acceso se realiza a través de un pozo, ha podido servir como abastecimiento a los antiguos pobladores de la zona (Marlasca y López, 2014).

De igual en modo, en nuestro caso, la cova de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia, Mallorca) fue donde se realizó un estudio del agua de algunos parámetros fisicoquímicos básicos mediante el análisis en un fotómetro multiparamétrico.

#### **5.7.4. La extracción de sondeos estratigráficos sedimentológicos**

La realización de un levantamiento estratigráfico es una técnica muy útil no solo para conocer la estratigrafía y potencia de las diferentes capas de sedimentos que conforman el sustrato del carst sino también para conocer el análisis micro-geoarqueológico del paleosuelo, ya que el estudio estratigráfico (micro) permite abordar muchos análisis diversos: paleobotánicos, cronológicos, químicos, sedimentológicos.... Además, gracias a esta técnica se puede averiguar qué efectos geológicos y ambientales han sufrido las zonas a estudio, completando la contextualización física, geológica, biológica y ambiental, en lo que actualmente se denomina arqueología del paisaje (Rodríguez Alcalde, 1995; Criado, 1999; Calvo, 2009; Picornell, 2012).

En los últimos años son muchos los estudios arqueológicos subacuáticos que defienden la necesidad de un conocimiento exhaustivo del paleosuelo sumergido a través de la extracción de sondeos o cores sedimentológicos para un posterior análisis micro-geoarqueológico (Rocha *et al.*, 2014; Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021).

Por otro lado, y aunque minoritariamente, también se aplica este estudio arqueométrico al estudio de cavidades sumergidas. Uno de los ejemplos más importantes es el desarrollado en la cueva submarina de Marigondon (Filipinas), de la cual se extrajo una estratigrafía continua. El objetivo de la investigación era determinar los vínculos entre las condiciones subacuáticas y las muestras estudiadas. De este modo, se llevaron a cabo metodologías analíticas como espectroscopía IR, difracción de rayos X, microscopía óptica, SEM/EDX y análisis de isótopos de las series de uranio para determinar la composición química de dos muestras de roca y sus estructuras cristalinas y edades de formación. Los resultados concluyeron que las dos muestras estaban compuestas principalmente por los dos polimorfos de carbonato de calcio, calcita y aragonito; sin embargo, las escleroesponjas contenían un bajo porcentaje de magnesio-calcita, lo que ilustraba un período de

inmersión. Así, en otros períodos, la cueva de Marigondon habría estado sobre el agua y habría sido favorable para la fauna del Pleistoceno y posiblemente para el asentamiento humano, como lo demuestra el depósito de travertino en la piedra caliza de coral (Rocha *et al.*, 2014).

En nuestro caso, la extracción de sondeos estratigráficos sedimentarios (en adelante cores) tenía la finalidad de realizar un estudio estratigráfico, micro-geoarqueológico y palinológico de las muestras extraídas. La extracción de muestras se realizó en todas las cuevas prospectadas en la presente tesis, desde las cuevas del Garraf y Colls- Miralpeix hasta las cuevas de Mallorca. Desafortunadamente, la falta de financiación no permitió finalmente un análisis micro-geoarqueológico, aunque sí que se consiguió un análisis estratigráfico básico, lo cual abrió hipótesis de trabajo para futuras intervenciones arqueológicas.



## CAPÍTULO 6

# YACIMIENTOS Y CUEVAS PROSPECTADAS

*“En tres tiempos se divide la vida: en presente, pasado y futuro. De éstos, el presente es brevísimos; el futuro, dudoso; el pasado, cierto”.*

*Lucio Anneo Séneca (4 a.C. - 65 d.C.)*

## 6. YACIMIENTOS Y CUEVAS PROSPECTADAS

### 6.1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN DEL ESTUDIO

Para entender y contextualizar el estudio arqueológico realizado, focalizado en la mejora de la metodología a utilizar en la prospección subacuática, hemos aplicado unas premisas al trabajo de campo y creado diferentes proyectos arqueológicos en distintas partes del territorio nacional, para tratar de conseguir resultados factibles de uso general. Es por esta razón que, a continuación, no solo citaremos las diferentes cavidades donde ejecutamos nuestra investigación, sino que expondremos cuales fueron los trabajos realizados y los distintos tipos de resultados obtenidos en cada uno de ellos, para así, comenzar a generar nuevos protocolos de actuación rigurosos y seguros (Fumás, 2022b).

La gran variedad de cavidades cársticas existentes en territorio español no hizo necesario el desplazamiento del equipo humano y logístico a otros países con importantes sistemas cársticos como Francia o México (Arroyo-Cabrales et al., 2015; Campbell, 2016, 2017; Barba Meinecke, 2020; Barba-Meinecke, Pizá Chavez y Quetz León, 2022). Ahora bien, dentro de las áreas de estudio y de prospección debíamos partir de unos planteamientos y objetivos claros como eran; una topografía previa de las cavidades a intervenir, la colaboración de un equipo investigador profesional, que conociera el entorno y las cavidades, y una morfología cárstica variada, donde se pudiera tanto mejorar las investigaciones realizadas hasta la fecha como experimentar nuevas técnicas y metodologías empíricas (Mora, 2017).

De este modo, se desarrolló una investigación compleja en la que se trató de intervenir en el máximo de cavidades sumergidas posibles, tanto en su extensión como en su morfología cárstica, buscando la mejora metodológica en cada una de las distintas casuísticas que se presentan delante de una prospección arqueológica (Avmami, 2003; García, 2014; Barba Meinecke, 2020). Así, los distintos tipos de prospección que se llevaron a cabo fueron; la prospección en cavidades semisumergidas por el agua del mar, la prospección en cavidades submarinas y, por último, la prospección en cavidades sumergidas por agua dulce.

Dentro de las cavidades semisumergidas, focalizamos nuestro estudio en las cavidades semisumergidas de la costa del Garraf (Barcelona) (Vilà, 2004; Daura y Sanz, 2009; Joan Daura *et al.*, 2010) y concretamente en la cova del Gegant en el paraje natural de Colls-Miralpeix en Sitges (Barcelona) (Izquierdo, 2014), en la cual ya se había llevado a cabo una importante labor arqueológica y científica durante años por parte del Seminari d'Estudis i Recerques Prehistòriques (SERP) encabezado por el Dr. Joan Daura Lujan y la Dra. Montserrat Sanz (J. Daura *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011; Daura y Sanz, 2014; Daura *et al.*, 2017, 2021, 2022). En lo que respecta al estudio de las cavidades sumergidas por el agua del mar, nos centramos en el estudio de la cova de la Falconera (Sitges) (Aymamí, 2007; Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a), la cual ya estaba englobada en una investigación arqueológica subacuática previa, encabezada por el arqueólogo Pere Izquierdo i Tugas, dentro del marco de la “Carta Arqueológica Subacuática de Sitges” (Izquierdo, 2014).

Por último, quedaba proseguir nuestro estudio arqueológico prospectivo en cavidades sumergidas en cavidades interiores sumergidas por agua dulce. Para ello seleccionamos cavidades en la isla de Mallorca (Ramis y Santandreu, 2011). Allí, desde finales de los años 90 un equipo de espeleo-buceadores del Grup Nord Mallorca (GNM), que posteriormente pasaron a denominarse Societat Espeleològica Balear (SEB), encabezados por Francesc Gràcia, habían encontrado restos arqueológicos en ocho cuevas de las decenas de cavidades cársticas sumergidas en la isla (Gràcia, 2015). En nuestro caso focalizamos nuestro estudio en seis de esas cuevas sumergidas, dentro del proyecto de investigación denominado Proyecto IASCM (Investigación Arqueológica Subacuática en las Cuevas de Mallorca (Fumás, 2021).

Las cuevas en las que se intervino fueron;

- La cova de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia).
- La cova del Sistema Sa Gleda-Camps des Pou (Manacor).
- La cova Genovesa o d'en Bessó (Manacor).
- La cova des Drac de Cala Santanyí (Santanyí).



**Figura 24.** Áreas territoriales de estudio; 1. Mapa de la península ibérica donde se muestran las dos zonas de intervención de las cuevas prospectadas en los diferentes proyectos (A y B). Fuente; Google Earth. 2. Zona A, perteneciente a la costa del Garraf. Fuente; Google Earth. 3. Zona B, perteneciente a la isla de Mallorca, concretamente a la zona oriental de la isla. Fuente; Google Earth.

## 6.2. LA PROSPECCIÓN ARQUEOLÓGICA SUBACUÁTICA EN CUEVAS SEMISUMERGIDAS

### 6.2.1. Las cuevas del Garraf central

#### 6.2.1.1. Introducción

Como hemos mencionado anteriormente, el estudio de las cuevas del Garraf formó parte del “Proyecto de la Revisión de la Carta Arqueológica Subacuática de Sitges” dirigido por Pere Izquierdo i Tugas, técnico de proyectos del Consorcio de Patrimonio de Sitges y arqueólogo experto. Esta carta profundizaba en el estudio arqueológico subacuático de la costa de Sitges, desde las cuevas prehistóricas del Garraf y Colls-Miralpeix hasta el estudio de la arqueología naval moderna de los buques del siglo XVII (Izquierdo, 2014).

Muchas de las cuevas del litoral del Garraf habían sido exploradas ya con anterioridad, como síntesis (Blasco et al., 2011; Daura, 2010; Daura y Sanz, 2012, 2009; Vilà, 2004). Las exploraciones de los últimos años se remontaban a 2015, cuando se llevaron a cabo inspecciones sistemáticas de la mayor parte de las cuevas y cavidades con potencial arqueológico en el frente marítimo de Macizo del Garraf, desde el núcleo urbano de Sitges hasta el puerto de Vallcarca (Sitges). En concreto, Izquierdo visitó las cuevas del Congre, del Pebre, de la Xarxa, de Punta Ferrosa y la más grande y peligrosa, la cova de la Falconera. En esta última sólo fue capaz de explorar su entrada, debido a la gran dificultad técnica, penetrando en el pozo interior que desciende hasta el punto donde llegaron en 1953 el equipo de Eduard Admella Ballester (Admetlla, 1957). Además, se acudió también a las cuevas de Colls-Miralpeix, concretamente a la cova del Gegant y a la cova Verda, que en ese momento tenían la entrada semisumergida. Su idea era hacer un estudio visual para comprobar la viabilidad de la realización de un futuro estudio arqueológico exhaustivo.

Así, una vez visitadas todas estas cuevas, se concluyó que era necesario un estudio más completo y detallado para verificar la posible existencia de restos arqueológicos bajo la capa de arena y guijarros.

De este modo, en 2016, y con la experiencia previa de las visitas a las cavidades efectuadas en 2015, se planteó la posibilidad de llevar a cabo un proyecto de investigación mucho más amplio y minucioso. Por ello, en el año 2017, en el marco de la “Revisión de la Carta Arqueológica Subacuática de Sitges 2017” se incluyó este trabajo de prospección que presentamos en esta tesis.

El primer lugar que se estudió fue la cova del Gegant, donde se propuso la necesidad de un análisis mucho más detallado del registro estratigráfico de suelo sumergido cerca de la boca de la entrada. Para ello se contó con la colaboración de los responsables del equipo de investigación de la Carta Arqueológica Subacuática de Sitges y de los arqueólogos responsables de la excavación arqueológica terrestre, llevada a cabo por los miembros del Seminari d’Estudis i Recerques Prehistòriques (SERP) de la Universidad de Barcelona, dirigidos por la Dra. Montse Sanz y el Dr. Joan Daura, los cuales habían estado trabajando durante años en la parte interna de la cova del Gegant (J. Daura *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011; Daura y Sanz, 2014; Daura *et al.*, 2017, 2021).

Las razones que llevaron a continuar y mejorar el estudio iniciado en 2015 por los profesionales encabezados por Pere Izquierdo y Frederic Malagelada fueron el gran potencial arqueológico de estas cavidades rocosas sumergidas, y sobre todo la mejora del estudio de la metodología de prospección en entornos cársticos sumergidos. Aprovechar y compartir el conocimiento proporcionado por la arqueología, la geología y el espeleobuceo era el mejor punto de partida para el estudio de esta temática de tan escasa bibliografía y poca metodología práctica en la arqueología subacuática de la costa del Garraf. También es cierto que las características de cada una de las cuevas, la superficialidad de sus entradas, la falta de una cartografía exacta y las dificultades innatas asociadas a esta disciplina complicaban hasta el extremo muchas de las investigaciones que se pretendían llevar a cabo, ya que la dificultad en su elaboración dependía de factores externos especialmente impredecibles, como los ambientales y marítimos.

Uno de los objetivos pendientes era la verificación de la existencia de estratigrafía arqueológica dentro de las cavidades costeras, sabiendo que este era un objetivo complejo ya que los acantilados del Garraf son especialmente peligrosos cuando hay oleaje, ya que el riesgo de accidente se multiplica dentro de las cuevas cuando el agua impacta contra las rocas del acantilado.

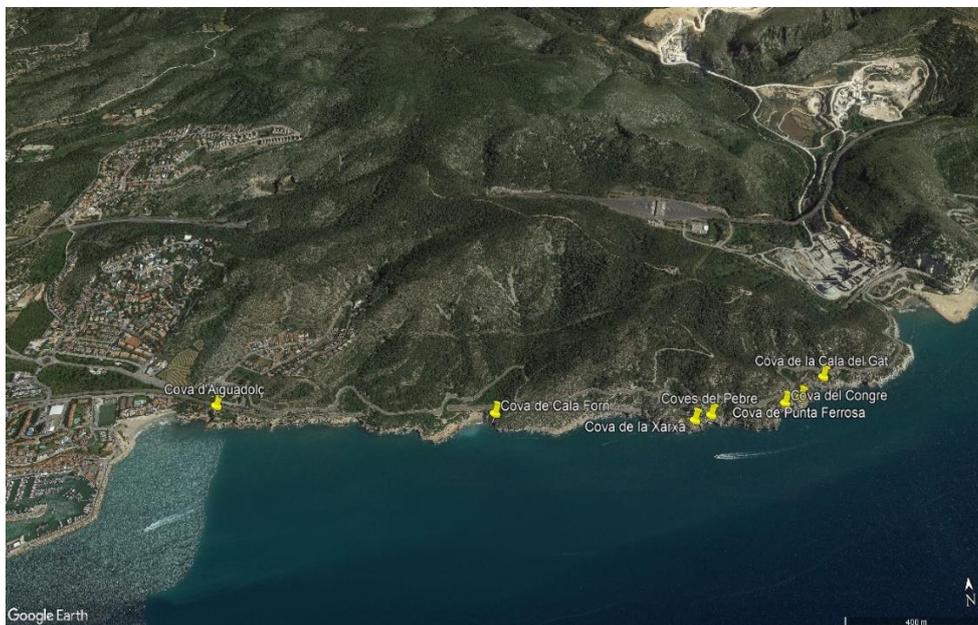
#### *6.2.1.2. Marco jurídico*

Este proyecto estaba incluido en el expediente R/N 470 K121 N-780 2017-1-20181 de autorización de intervención arqueológica preventiva: Revisió de la Carta Arqueològica subaquàtica de Sitges (Sitges, Garraf), según el procedimiento establecido en el artículo 14 y a raíz del Decreto 78/2002, de 5 de marzo de 2002, sobre el Reglament de Protecció del Patrimoni Arqueològic i Paleontològic. De acuerdo con la base de la ley; I) Artículo 47 y continuación de la Ley 9/1993, de 30 de setembre, de Patrimoni Cultural Català (DOGC N.º 1807), II) Decret 78/2002, de 5 de març de 2002, del Reglament de protecció del patrimoni arqueològic i paleontològic (DOGC núm. 3594), III) Decret 304/2011, de 29 de marzo, de reestructuració del Departament de Cultura (DOGC núm. 5849, de 31.3.2011); y Resolució CMC/254/2010, de 8 de enero, de Delegació de Competències del titular de la Direcció General del Patrimoni Cultural en los directores dels Serveis Territorials de la Consellería de Cultura i Mitjans de Comunicació de la Comunitat (DOGC núm. 5566, de 12.2.2010).

Este reglamento autorizó al Consorcio de Patrimonio de Sitges y al director de la Carta Arqueológica Subacuática, Pere Izquierdo i Tugas, a la intervención arqueológica programada, dentro del marco del proyecto de investigación de la Carta Arqueológica Subacuática de Sitges, que se llevó a cabo de conformidad con lo dispuesto en la Llei 9/1993, del Patrimoni Cultural Català, i el Decret 78/2002, sobre el Reglament de Protecció del Patrimoni Arqueològic i Paleontològic.

### 6.2.1.3. Marco geográfico y geológico de las cuevas del Garraf

El estudio de este proyecto se centró específicamente en el marco geográfico del Macizo del Garraf y la zona de interés natural situada en Sitges, en la comarca del Garraf, provincia de Barcelona. El municipio de Sitges tiene un litoral de más de 16 kilómetros de costa, la mitad de los cuales corresponden a los acantilados del Macizo del Garraf y sus contrafuertes, y la otra mitad a playas con fondos arenosos (Daura y Sanz, 2009) (Fig. 25).



**Figura 25.** Localización de las cuevas en el litoral del Garraf. Fuente; Google Earth.

El Macizo del Garraf se extiende a lo largo de su costa desde la localidad de Sitges hasta el pueblo de Garraf (perteneciente al municipio de Sitges) con un total de 9 cuevas sumergidas o semisumergidas.

Geológicamente, el Macizo del Garraf está formado por materiales del Cretácico Inferior-Jurásico tardío, que cubren una base paleozoica y triásica. Estos sedimentos fueron depositados durante la etapa mesozoica. Durante el Aptiense, el hundimiento tectónico se acentuó, mientras que se produjo una gran transgresión marina, lo que llevó a una sedimentación de facies marina más profunda (Moreno, 2007). El macizo ocupa una zona triangular entre el valle del

Llobregat, la depresión del Penedès y el mar Mediterráneo, con montañas de una altitud máxima de 600 metros sobre el nivel del mar. El macizo de 9967 hectáreas pierde altura y desaparece en la zona costera cerca de El Vendrell (Borrell et al., 2016).

La mayor parte de las cuevas litorales están sumergidas debido al cambio de las corrientes marinas costeras, acentuadas en los últimos años por la construcción de los puertos deportivos de Sitges y de Garraf. Las principales cuevas sumergidas o semisumergidas que se conocen actualmente en la costa del Macizo del Garraf son las que enumeraremos a continuación: la cova del Vell Marí, la cova del Congre, la cova de l'Aiguadolç, la cova de Punta Ferrosa, la cova de Cala del Gat, la cova de la Xarxa, la cova del Pebre y la cova de Cala- Fort.

Sin embargo, nuestro estudio en el área del Macizo del Garraf sólo se centró en tres de estas cavidades, porque la estratigrafía, la ubicación geográfica, la orientación y las posibilidades de encontrar potencial arqueológico eran mayores. Todas las cuevas mencionadas anteriormente ya habían sido topografiadas por parte de los miembros del Equipo de Investigación Espeleológica (ERE) del Centre Excursionista de Catalunya (CEC), siendo posteriormente documentadas en la Memoria de la Carta Arqueológica de Sitges 2015.

#### 6.2.1.4. *Objetivos generales de la prospección*

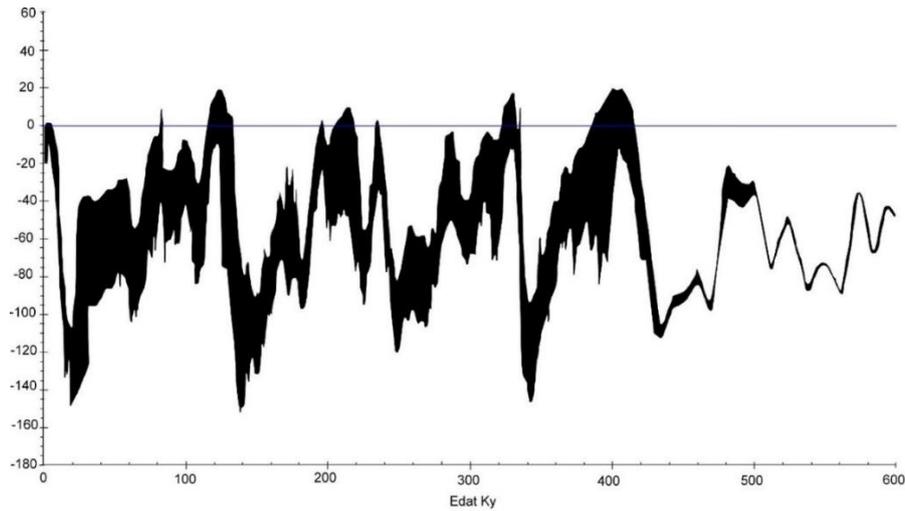
El objetivo principal de este trabajo era mejorar las técnicas de prospección arqueológica subacuática en cuevas litorales, lo cual nos debía permitir saber si estas cavidades sumergidas del litoral barcelonés presentaban registro sedimentario, y en caso de tenerlo, poder realizar una caracterización del relleno estratigráfico y sedimentológico (Vera, 1994; Torres y Delgado, 2009; Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021). Además, otro de los objetivos era también determinar si estas cavidades habían sido utilizadas y, si así fue, averiguar a través del estudio del registro estratigráfico cual fue su función. Sabemos que, durante el último estadio glacial, es decir, durante los estadios isotópicos 4 al 2, y especialmente durante el *Last Glacial Maximum* (LGM) hace aproximadamente 20.000 años, el mar descendió aproximadamente 100 metros por debajo del nivel

actual. En ese momento, éstas y otras cavidades pudieron haber sido utilizadas, sin embargo, desde entonces, el calentamiento global ha provocado una subida del nivel del mar, inundándolas de forma permanente (Gàmez, 2007) (Tabla 4).

EVOLUCIÓN DEL NIVEL MARINO DURANTE EL PLEISTOCENO SUPERIOR Y HOLOCENO					
Nivel marino metros	Distancia a la línea de costa Km	Pulso transgresivo	Fecha BP (no cal.)		Momento cultural
0 a + 2 m	-0,01 a -0,05	mwp-1d	7500	H O L O C E N O	Epipaleolítico
- 10	0,3 a 0,75	Ninguno	8400		
- 20	0,7 a 1,1	mwp-1c	9300	P L E I S T.  S U P.	Aziliense
-30	1,2 a 1,7	MWP-1B	9600		
-40	2,1 a 2,6		11000		
-50	2,9 a 3,4		11300		
-60	3,8 a 5,5		11400		
-70	5,9 a 6,6	MWP-1A	13500	Magd. Superior-Final	
-80	7 a 7,6		14000	Magdalenense Medio	
-90	8,8 a 9		14200	Magdalenense Inferior	
-100	10,5	Final de mwp-2b	17500	S U P.	Solutrense
-105	11,2	mwp-2b	17800		
-110	> 12	mwp-2a	19000		
-120 a -130	> 12		>19500 (LMG)		

**Tabla 4.** Evolución del nivel marinos desde el final del Pleistoceno Superior y el Holoceno en el hemisferio norte, en el océano Atlántico. Fuente; (Edeso-Fito y Mujika-Alustiza, 2017).

Desde el comienzo del Holoceno hasta ahora, el nivel del mar ha ascendido unos 35 metros y casi 120 metros desde el LGM, por lo que durante gran parte del Pleistoceno Superior el nivel del mar ha dejado grandes extensiones de tierra expuestas, donde los grupos humanos probablemente encontraron sitios de asentamiento propicios cerca de la costa (Edeso-Fito y Mujika-Alustiza, 2017). Sabedores de que algunas de las principales transformaciones en la prehistoria ocurrieron cuando el nivel del mar era más bajo que en la actualidad, incluyendo; los orígenes de la pesca, la dispersión de los primeros pobladores, los comienzos de la navegación o las primeras economías agrícolas, etc., (Ramis *et al.*, 2002; Flemming *et al.*, 2014) era necesario indagar e intentar extraer más información a través de las prospecciones arqueológicas subacuáticas (Gráfico 2).



**Gráfico 2.** Evolución del nivel del mar Mediterráneo en metros (izquierda) integrando los datos máximos y mínimos desde el Pleistoceno hasta la actualidad. Fuente; (Rabineau *et al.*, 2006).

#### 6.2.1.5. Las cuevas semisumergidas a estudio

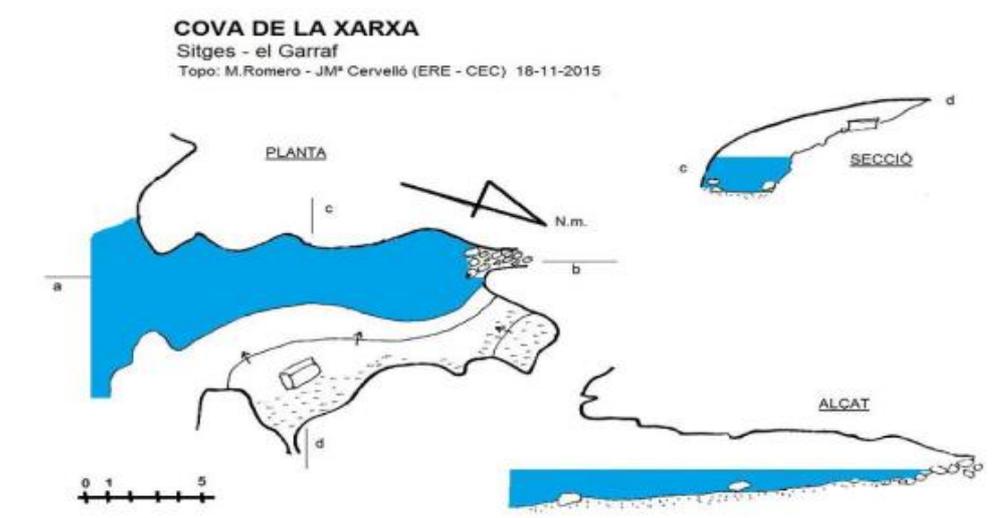
Las tres cuevas semisumergidas donde centramos nuestro estudio fueron: la cova de la Xarxa, la cova del Congre y la cova del Pebre. En todas ellas, se realizó una prospección superficial con el objetivo de determinar si existían restos arqueológicos.

Todas estas cavidades semisumergidas litorales del Garraf tienen pequeñas surgencias de agua dulce que desembocan al mar, lo cual nos indica que era la propia presión de esta agua dulce, al llenarse las capas freáticas del interior de la montaña, la que ejercía una presión interna que erosionaba y modelaba geológicamente muchas de estas cavidades. Esta agua dulce en modo de surgencia era conocida por navegantes y marinos desde antaño, siendo probablemente aprovechados estos manantiales como puntos de aguada (Astier, 1971; Marlasca, 2014; Andreu *et al.*, 2016).

##### 6.2.1.5.1. La cova de la Xarxa

La cova de la Xarxa, UTM 31N, X: 403647, Y: 4565436, tiene una gran boca de entrada (5 x 8 metros), la cual esta parcialmente inundada. El lado oeste de la

cavidad pertenece al cauce de la surgencia interna, a través de la cual el agua es evacuada, mientras que la galería, con su fondo arenoso, termina colapsada por bloques redondeados. En el lado este, con un techo bajo rocoso y una pendiente suave, parece haber sido causado por fugas del agua en la tabla de estratificación (Custodio *et al.*, 1993; Waltham, 2002; Andreu *et al.*, 2016) (Figs. 26 y 27).



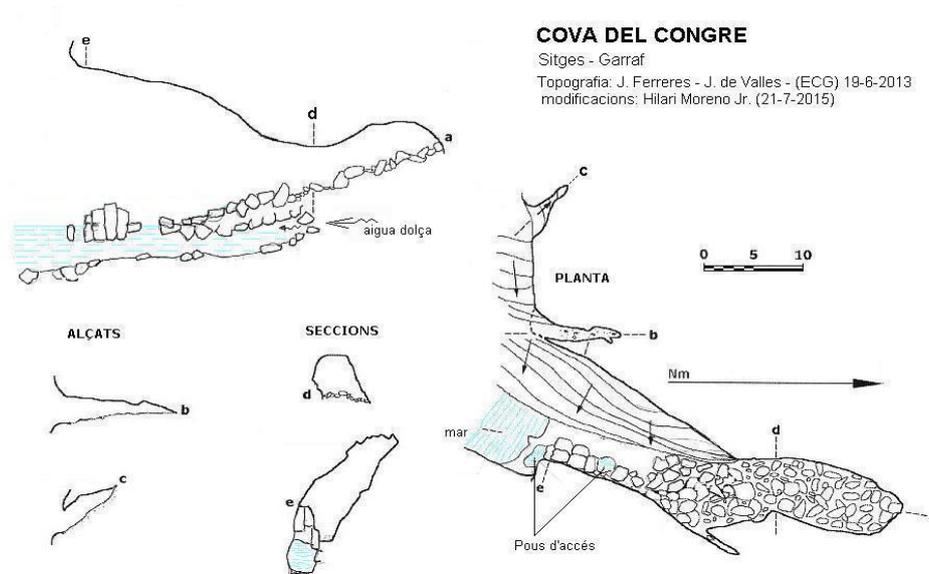
**Figura 26.** Topografía de la cova de la Xarxa. Autor; M. Romero y J.M. Cervelló. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.



**Figura 27.** Imágenes de la cueva semisumergida de la Xarxa. **1.** Vista de la entrada exterior de la cueva. **2.** Vista de la entrada interior de la cueva. (Fotos; Josep María Cervelló). Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

### 6.2.1.5.2. La cova del Congre

La cueva semisumergida del Congre, UTM 31N, X: 403976, Y: 4565469, es una cavidad que se va abriendo progresivamente hasta alcanzar los 36 metros de largo bifurcándose en el interior de la cavidad en dos pequeñas galerías paralelas de 5 y 10 metros respectivamente (Figs. 28 y 29.1).

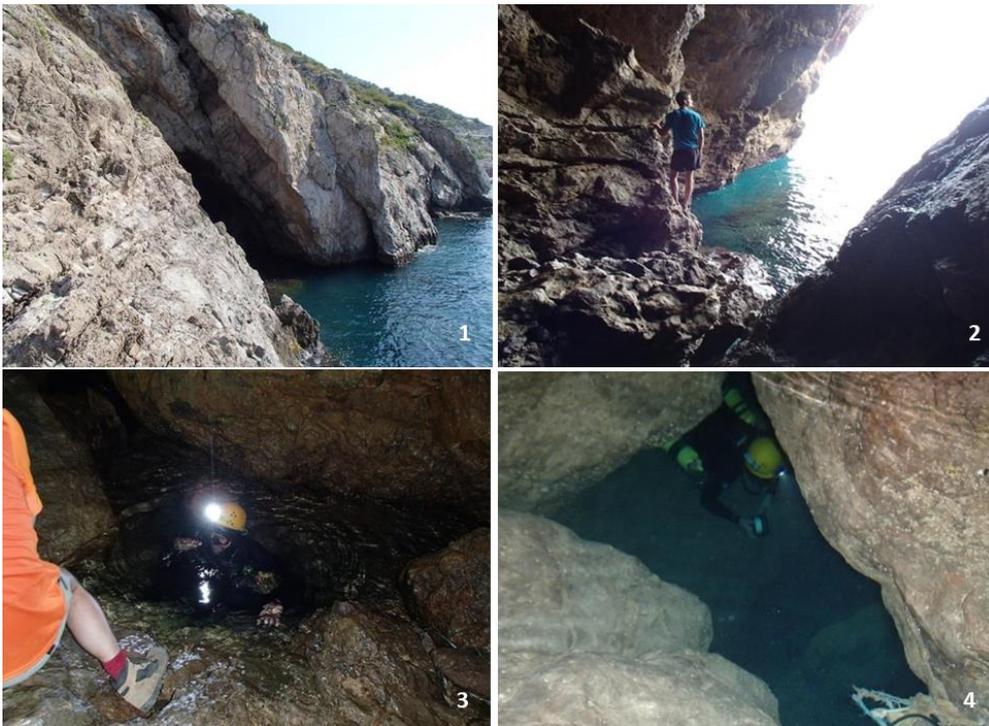


**Figura 28.** Topografía de la cova del Congre. Autor; J. Ferreres y J. de Valles. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

La cueva tiene una gran boca de acceso de 14 x 17 metros, y en su lado oeste existe una rampa muy pronunciada de grandes bloques rocosos que conduce al nivel del mar. Este caos de grandes bloques permite subir a través de la galería principal hasta el tramo final donde el techo es descendente y las rocas y sedimentos se acumulan (Fig. 29.2).

Desde la sala principal hay un conducto estrecho de 7 metros en dirección ascendente con gran un bloque rocoso entre sus paredes. Dos agujeros en el suelo, uno a nivel del mar y el otro una decena de metros hacia el interior, permiten el acceso a una galería inundada de entre 2 y 4 metros de diámetro de desarrollo, la cual se encuentra ubicada bajo la galería principal, entre grandes bloques de piedra, con una ramificación de unos 4 metros en el lado oeste (Fig. 29.3).

La gruta submarina tiene una surgencia interna activa que suministra un caudal de flujo de agua lo suficientemente importante como para que en verano haya una diferencia notable de temperatura entre el agua dulce que mana de su interior y el agua del mar. Por encima de la boca y en su lado oeste encontramos dos pequeñas galerías: la superior, que sube 5 metros y la inferior, de 10 metros de largo y con el suelo ocupado por arenas. La pendiente total es de 21,5 metros (-4.5; +17) y tiene un recorrido de 77 metros, de los cuales 32 son submarinos<sup>37</sup> (Fig. 29.4).



**Figura 29.** Imágenes de la cueva semisumergida del Congre; **1.** Entrada semisumergida de la cueva. **2.** Acceso terrestre a la cueva. **3.** Espeleo-buceador entrando en la parte sumergida de la entrada de la cueva. **4.** Espeleo-buceador sumergiéndose en la galería inundada en la entrada de la cueva. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

<sup>37</sup> Espeleoindex.com. AA (1968).- “Cova del Congre. Sitges” Soterrània (1): 16. GE Talaia de l'Agrupació Excursionista Talaia. Vilanova i la Geltrú. Borràs, J. (1974).- Catalogo espeleológico del macizo de Garraf. Vol. III . 207 pp. Barcelona. Selecció de dades i topografies extretes del blog: cavitatsdecatalunya.blogspot (de Jordi de Vallès). Apunt del 17-8-2013. Dades: J. Ferreres, J. de Vallès (ECG), J. Cuenca, F.X. Samarra (GE Badalona). Actualització de dades, fotografies i revisió topografia: ERE – CEC.

#### 6.2.1.5.2.1. Historia de la investigación arqueológica de la cavidad

Esta es una cueva bien conocida por los pescadores y que fue prospectada arqueológicamente por la Dra. Montse Sanz y Anna Blanco del Grup de Recerca del Quaternari (SERP) del Departamento de Historia y Arqueología de la Universidad de Barcelona (UB), quienes no encontraron ningún resto antrópico ya que cuando hay fuertes tormentas el agua inunda toda la cavidad y el oleaje arrastra todos los sedimentos hacia el mar. Sólo se encontraron algunas pinturas en las galerías superiores que, una vez analizadas, resultaron ser de época moderna (Fig. 30).

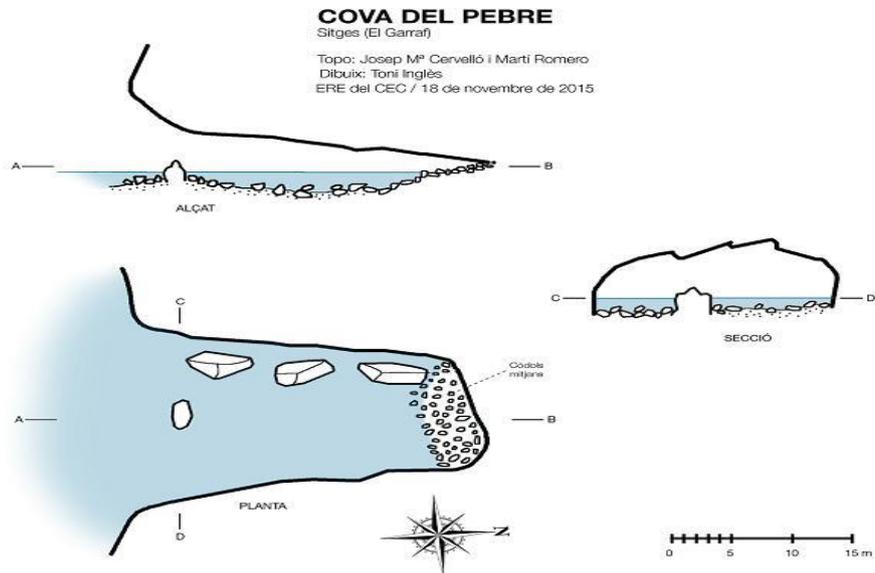


**Figura 30.** Imagen donde se aprecia al geólogo Josep María Cervelló inspeccionando la parte superior de la cova del Congre, completamente seca, situada en la costa del Garraf. (Foto; Autor).

#### 6.2.1.5.3. La cova del Pebre

La cova del Pebre, UTM 31N, X: 403708, Y: 4565450, es muy conocida entre los pescadores y pobladores del Garraf, aunque no así su topografía que fue

actualizada por el geólogo Josep María Cervelló y Martí Romero en el año 2015 y publicada en la página web denominada Espeleoindex<sup>38</sup> (Fig. 31).



**Figura 31.** Topografía manual escalada realizada por el geólogo Josep María Cervelló y dibujada por Toni Inglès. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

La cova del Pebre tiene una boca de grandes dimensiones (22 x 11 m.) que se reducen ligeramente a medida que se penetra en la galería. Su entrada se encuentra totalmente anegada de grava redondeada formando una playa (Figs. 32.1 y 32.2). En su lado oeste existen grandes bloques de roca procedentes de deslizamientos de tierra junto con bloques de menor tamaño y cantos rodados producidos por la fricción entre ellos y la arena. Esta cueva es conocida desde tiempos remotos por los pescadores de la zona cuyo nombre de origen se desconoce. Es citado por primera vez por Faura i Sans en su *Colección* (1909) (Faura y Sans, 1907), y en los últimos 40 años ha sido georreferenciada en varias ocasiones en los mapas de la Editorial Alpina (y por lo tanto en el mapa del ICGC), asignándole un recorrido suficientemente correcto de 23 metros.

<sup>38</sup> <https://espeleoindex.com/>



**Figura 32.** Imágenes de la cova del Pebre. 1. Vista de la entrada exterior. 2. Vista de la entrada interior de la cova del Pebre. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

#### 6.2.1.5.3.1. Historia de la investigación

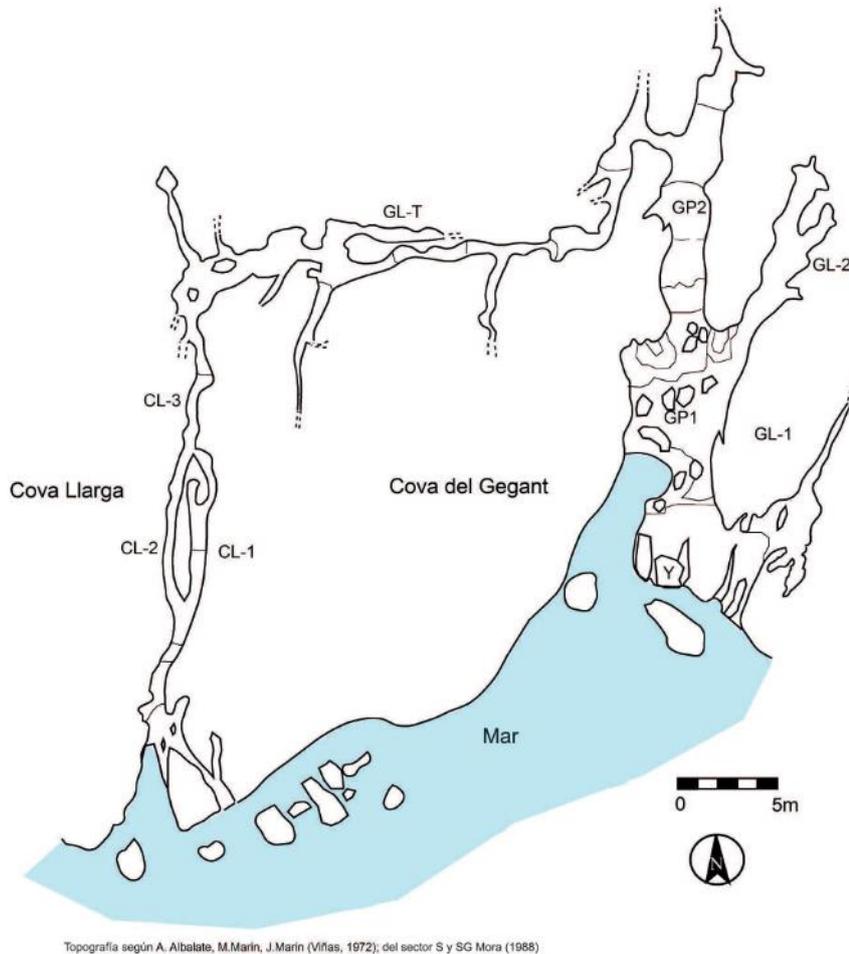
La cova del Pebre es una cavidad conocida desde tiempos remotos por los pescadores de la zona, los cuales debieron aplicarle este topónimo, del que no conocemos la procedencia. Es citada por primera vez por Faura y Sans en su obra “Recull espeleològic de Catalunya” realizada en 1907 (Faura y Sans, 1907).

#### 6.2.2. Las cuevas del Garraf meridional: Colls-Miralpeix

Las cuevas semisumergidas de Colls-Miralpeix se encuentran ubicadas en la denominada Punta de les Coves, entre las poblaciones de Sitges y Vilanova i la Geltrú, y están situadas en el borde marítimo del Macizo del Garraf, en una cadena montañosa de bajo relieve compuesta por calizas y dolomitas del Jurásico y Cretácico. Allí, existen una serie de cavidades cársticas estudiadas desde antaño donde se han encontrado restos arqueológicos y paleontológicos de diferentes cronologías. Algunas de estas cavidades son; la cova dels Musclos (Simon, 2006), la cova Verda (Petit y Rovira, 1980), la cova del Gegant (Daura y Sanz, 2014) (Fig. 33) o la recién descubierta cova Aina.

### 6.2.2.1. La cova del Gegant

Sin duda, la cova del Gegant, UTM 31N, X: 397261, Y: 4564297, es la más interesante de las existentes en el paraje natural de Colls-Miralpeix, concretamente en la mencionada Punta de les Coves.



A

**Figura 33.** Topografía de la cova del Gegant realizada en 1972. Fuente; (Viñas y Villalta, 1975; Daura y Sanz, 2014).

Tanto la cova del Gegant como la cova Llarga forman parte del mismo complejo cárstico y se comunican internamente a través de un conducto interior (GL-T). La cova del Gegant es el yacimiento que más restos humanos neandertales ha aportado al conocimiento prehistórico de Cataluña, concretamente son 5 los restos humanos del yacimiento (Quam *et al.*, 2015; Daura *et al.*, 2021). De todos ellos

destaca una mandíbula neandertal procedente de las excavaciones realizadas en 1954 y que correspondería a un individuo mayor de 15 años (Daura *et al.*, 2005; Sanz, Daura y Subirà, 2005; J. Daura *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011) (Fig. 34) y una mandíbula y húmero infantil (Quam *et al.*, 2015).

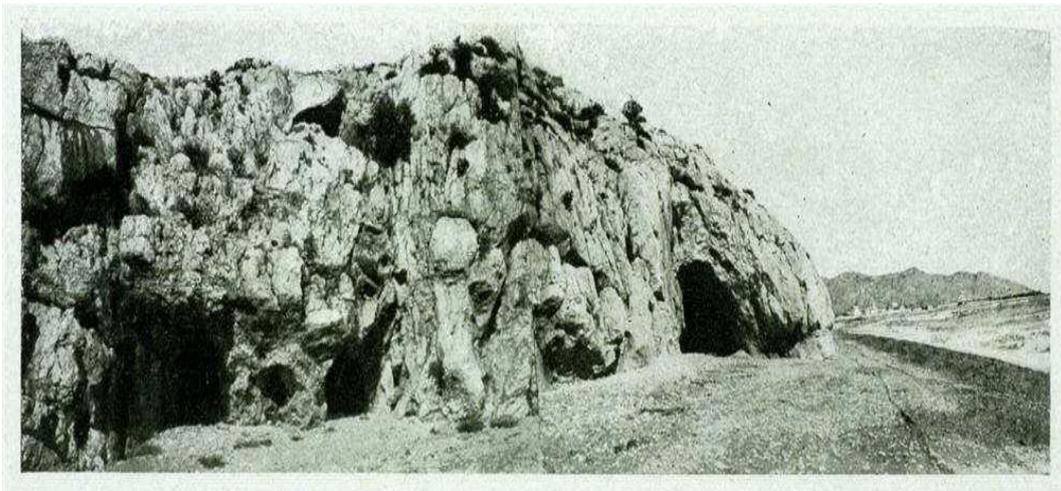
#### 6.2.2.1.1. Historia de la investigación arqueológica de la cavidad

Como el resto de las cavidades de Sitges, conocidas desde tiempos inmemoriales, a principios del siglo XX, todavía existía una playa de unos 10 metros de ancho entre la entrada a las cuevas y el mar, que desapareció, entre otras causas, por la construcción de los puertos de Vilanova i la Geltrú i Sitges. La primera mención espeleológica la proporciona Font i Sagué en su “Catàleg” (1897) y Faura i Sans en su Recull (1909) (Faura y Sans, 1907); este último ya mencionaba específicamente la boca superior. Pero, no fue hasta la década de 1950 cuando se registraron los primeros estudios en la cueva para salvar y documentar los restos del yacimiento cuaternario de su interior por parte de la Agrupació Muntanyenca de Sitges (AMUNT) en 1956 y del Museo Biblioteca “Víctor Balaguer” en Vilanova i la Geltrú, en momentos indeterminados de la década de los 50.

A principios de la década de 1960, Antoni Ferrer junto a otros compañeros de Vilanova llevaron a cabo trabajos de topografía en todas las cavidades de la Punta de les Coves. Y fueron ellos los que, en enero de 1965, tras atravesar muchos pasos estrechos, pudieron lograr la unión entre la cova del Gegant y la cova Llarga. A principios de la década de 1970, investigadores liderados por R. Viñas y J. F. Villalta llevaron a cabo una nueva campaña para investigar los restos del cuaternario. Es en esta misma época cuando se realiza la topografía más completa y precisa de la cueva. Aun así, en julio de 1985 primero y en 1989 después, se llevaron a cabo dos intervenciones de emergencia (J. Martínez, J. Miret, R. Mora y L. Muro) con el fin de salvar algunos restos del yacimiento, cada vez más dañados por la acción del mar. A mediados de 2005, se dio a conocer una mandíbula humana de las primeras excavaciones realizadas por Santiago Casanova, durante la década de 1950, la cual estaba entre un conjunto de más de 500 piezas que fueron entregadas en 1998 al Archivo Histórico de Sitges y que su

director X. Miret facilitó a los arqueólogos de la Universidad de Barcelona (UB), el Dr. Joan Daura y la Dra. Montserrat Sanz, quienes junto a otros la identificaron como una mandíbula de neandertal.

Desde 2005, el Grup de Recerca del Quaternari (GRQ, SERP) del Departamento de Historia y Arqueología de la Universidad de Barcelona (UB), investiga el yacimiento, bajo la dirección de la Dra. Montserrat Sanz y el Dr. Joan Daura. Aunque los investigadores acceden actualmente al interior de la cueva descendiendo a través de una sima de 14 metros de profundidad, situada justo encima de la galería principal, en el pasado el acceso natural era a través de una playa de guijarros que desapareció por completo a medida que las corrientes marinas cambiaron, debido a la construcción de los puertos marítimos de Sitges (Fig. 34).



**Figura 34.** Imagen del acceso a las cuevas de la Punta de les Coves antes de la construcción de los puertos deportivos. Fuente; Centre Excursionista Barcelonés, 1928 (Archivo Histórico de Sitges).

La cova del Gegant contiene restos fósiles de neandertales, niveles arqueológicos musterienses asociados y ocupaciones relacionadas con la transición del Paleolítico Medio y Superior. Las últimas investigaciones realizadas por el equipo del Dr. Daura y la Dra. Sanz han proporcionado un marco cronológico completo del sitio arqueológico, utilizando múltiples técnicas de datación radiométrica (uranio-torio, radiocarbono y luminiscencia) y análisis sedimentológicos y micro morfológicos, así como un modelado bayesiano. Este

enfoque cronoestratigráfico integrado les permitió reconstruir de manera fiable la historia del sitio y realizar correlaciones con otros sitios a nivel regional.

El marco cronológico de cova del Gegant está correlacionado con otros yacimientos del Paleolítico Medio y Superior del NE de la península ibérica, revelando un registro de ocupación humana sucesiva, coincidente con un período de enfriamiento global progresivo y descenso del nivel del mar. De este modo, los estudios sedimentológicos apuntaron al surgimiento de una plataforma costera frente a la cueva e indicaron que las condiciones paleo ambientales locales probablemente beneficiaron los desplazamientos humanos a lo largo del margen litoral, favoreciendo la ocupación repetida de la cueva durante el Pleistoceno Superior (Daura *et al.*, 2021).

#### 6.2.2.1.2. *Objetivos e hipótesis de estudio*

La propuesta de estudio trató de encontrar una metodología arqueológica prospectiva subacuática que permitiera, por un lado, el registro de posibles restos antrópicos en la parte exterior de la cueva mientras que, por otro lado, se intentaban formular preguntas y respuestas concretas a un área de investigación específica, como era la entrada sumergida de la cavidad, con un posible registro arqueológico prehistórico concreto.

Según los estudios de Holly Moyes, en este tipo de cuevas, el vestíbulo exterior pertenecería a la denominada zona de trabajo. En estos espacios, los restos que habitualmente encontramos se relacionan con todo tipo de actividades económicas y de tipo doméstico, como, por ejemplo, trabajos de fabricación de útiles, procesamiento de carcasas y pieles, etc. (Moyes, 2012).

Nuestro objetivo no era plantear una investigación en los fondos submarinos de la costa mediterránea de Sitges, debido a que los fondos de arena han colmatado cualquier tipo de formación cárstica susceptible de investigación.

Ciertamente, era aconsejable plantearnos el hecho de apoyarnos en estudios metodológicos previos, llevados a cabo mediante la investigación en arqueología intermareal, donde las oscilaciones del mar o el océano crean una dinámica

concreta que debe ser tratada de un modo específico, puesto que estos espacios se encuentran sumergidos intermitentemente bajo el mar, expuestos a factores atmosféricos, sujetos a procesos de sedimentación-erosión, a una hidrodinámica de gran energía y a la interacción de agentes bióticos específicos (Grosso *et al.*, 2019). En este aspecto, esto no era así puesto que las mareas no afectaban a la costa de un modo notorio, al estar bañadas por el mar Mediterráneo. En cambio, las costas sí que se veían afectadas por la erosión provocada por el oleaje y las construcciones antrópicas alrededor del área de estudio, como los puertos deportivos, los espigones, los dragados constantes de arena para la rehabilitación de playas, etc. Todas estas acciones habían aumentado de un modo considerable y artificial el nivel del mar en la boca de las cuevas dificultando exponencialmente el trabajo de registro arqueológico.

Las metas del estudio metodológico propuesto en la zona sumergida de la cova del Gegant fueron la mejora de las técnicas de trabajo en prospección visual, el geoposicionamiento correcto del área subacuática de trabajo, la localización de posibles sitios o restos arqueológicos sumergidos y la extracción de muestras sedimentológicas en busca de estratigrafía arqueológica.

Conocida la evolución de la oscilación del nivel del mar desde el Pleistoceno Superior al Holoceno y sabiendo que la profundidad del área sumergida a prospectar en el vestíbulo exterior de la cueva era de -2.5 metros, la cronología histórica de regresión marina correspondería a los niveles de los últimos ~10 ka BP., lo cual nos debería haber permitido aportar información adicional a los niveles holocenos preservados en el interior de la cavidad, los cuales se agrupan dentro de los episodios 4 al 7 (Daura *et al.*, 2017).

En la cova del Gegant existe un importante hiato sedimentario entre los niveles del Pleistoceno Superior de los episodios 1 al 3 (el más reciente tiene una fecha ca. 30 ka BP) y los del Holoceno, concretamente el nivel XXV de la Edad del Bronce. Por este motivo, uno de los objetivos era conocer si en la zona exterior sumergida podrían conservarse restos de esta parte no representada en el yacimiento.

La realización de los estudios estratigráficos convencionales dentro del vestíbulo de la cueva estaba directamente influenciada por la superficialidad y por la fuerza

del mar. Debido a que la posibilidad de un accidente de choque contra las rocas era alta, especialmente si trabajábamos en la boca de la cavidad, nos hizo pensar que teníamos que encontrar otro tipo de ubicación más segura que nos permitiera llevar a cabo un estudio rápido y efectivo.

La falta de seguridad imposibilitó la realización de estudios convencionales por lo que se intentó extraer muestras sedimentológicas, es decir, cores o columnas estratigráficas de un máximo de dos metros de profundidad. Para ello, se introdujo en el suelo, en la parte exterior sumergida de la cavidad, un tubo de metal de 5 cm de diámetro, que fue clavado por percusión directa hasta llegar al fondo rocoso.

### 6.3. LA PROSPECCIÓN EN CUEVAS SUBMARINAS

La definición de cueva submarina que defiende la presente tesis es aquella cavidad que se encuentra inundada por agua marina de forma permanente y que carece o apenas existen partes secas en su morfología cárstica.

#### 6.3.1. La Falconera

En el año 2015, los responsables de la “Carta Arqueológica de Sitges” exploraron parte del vestíbulo de su entrada, debido a la gran dificultad para penetrar en la galería interior que desciende hasta el punto donde llegaron en 1953, el equipo de Eduard Admetlla (Admetlla, 1957). Sin embargo, no fue hasta el año 2017, gracias a la “Revisión de la Carta Arqueología Subacuática de Sitges 2017”, cuando el “Proyecto Falconera” se incluyó dentro de la campaña arqueológica con una propuesta clara (Fumás, 2022a).

##### 6.3.1.1. Contexto geográfico y arqueológico

La cova de la Falconera, UTM 31N, X: 407143, Y: 4567343, es una cueva ubicada en el Macizo del Garraf, cerca del puerto deportivo del núcleo de población de Garraf (Sitges) (Figs. 35 y 36). Esta cavidad se encuentra

topográficamente bajo el nivel del mar actual, y presenta en su interior una corriente de agua dulce que se origina en los niveles freáticos subterráneos del Macizo del Garraf. La surgencia actual es conocida como el río subterráneo de la Falconera y discurre hacia el interior siguiendo el Torrente de la Falconera. Además, presenta una importante presión de salida que se contrarresta por la presión ejercida por el fuerte oleaje que golpea las costas rocosas del Garraf (Aymamí, 2007).



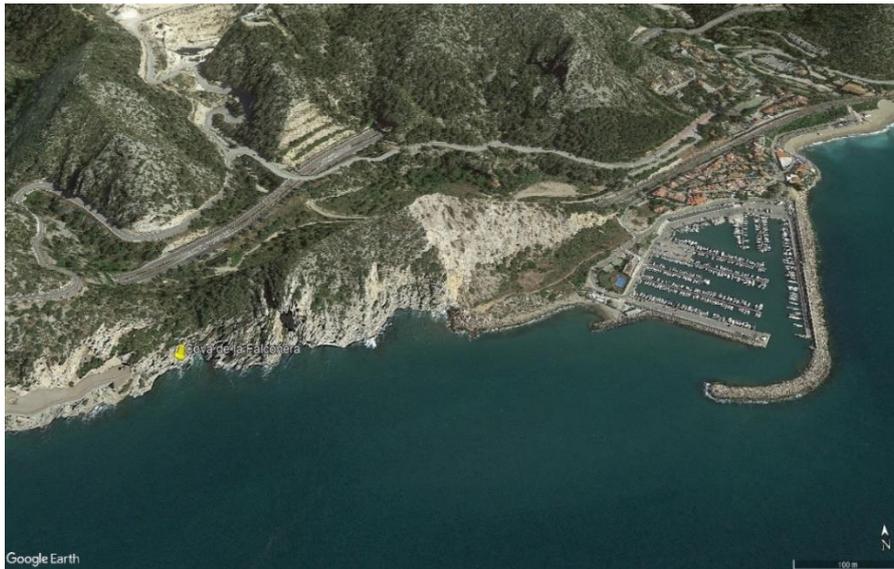
**Figura 35.** Plano cartográfico con la ubicación de las principales cuevas situadas en el Macizo del Garraf (Barcelona). Fuente; Adaptación (Carta arqueológica subacuática de Sitges 2017) (Fumás, 2022a).

Concretamente, el área en la que se encuentra la cova de la Falconera corresponde con el Parque del Garraf y en él hay una gran cantidad de yacimientos arqueológicos de diversas cronologías (Fumás, 2022a) (Fig. 36).

Tras un estudio detallado de los yacimientos más cercanos a la cavidad, se encontraron cuevas prehistóricas habitadas en diferentes momentos de la antigüedad. Se citan a continuación cuatro de las más cercanas y más importantes; I) la cova del Gegant (Sitges), en la cual se encontraron, desde restos neandertales con cronologías superiores a los 60.000 años (Daura, et al., 2010), hasta restos de decoraciones epi-campaniformes de la Edad del Bronce (Daura et al., 2017), II) la cova de Coll Verdaguer (Cervelló), en la que se encontraron restos líticos en la

Sala del Llop, con una cronología del Paleolítico Medio Musteriense (Joan Daura *et al.*, 2010), III) la cova de Sant Llorenç (Sitges), con cronologías desde el Neolítico Antiguo y Neolítico Cardial hasta la época romana (Borrell *et al.*, 2014; Borrell *et al.*, 2016) y IV) la cova de Can Sadurní (Begues), con restos de industria lítica geométrica y microlaminar, perteneciente a cazadores recolectores con cronologías que van desde el Epipaleolítico hasta el época islámica (Blasco, Edo y Villalba, 2011; Edo y Antolín, 2016; Bergadà *et al.*, 2018).

Probablemente, al final del LGM fue cuando aumentó el nivel del mar e inundó la cavidad de la Falconera, al mezclar su agua salada con el agua dulce que brotaba en su interior y finalizó, de este modo, un posible uso como punto de abastecimiento de agua por parte de los antiguos habitantes del Garraf (Avmami, 2003; Vilà, 2004).

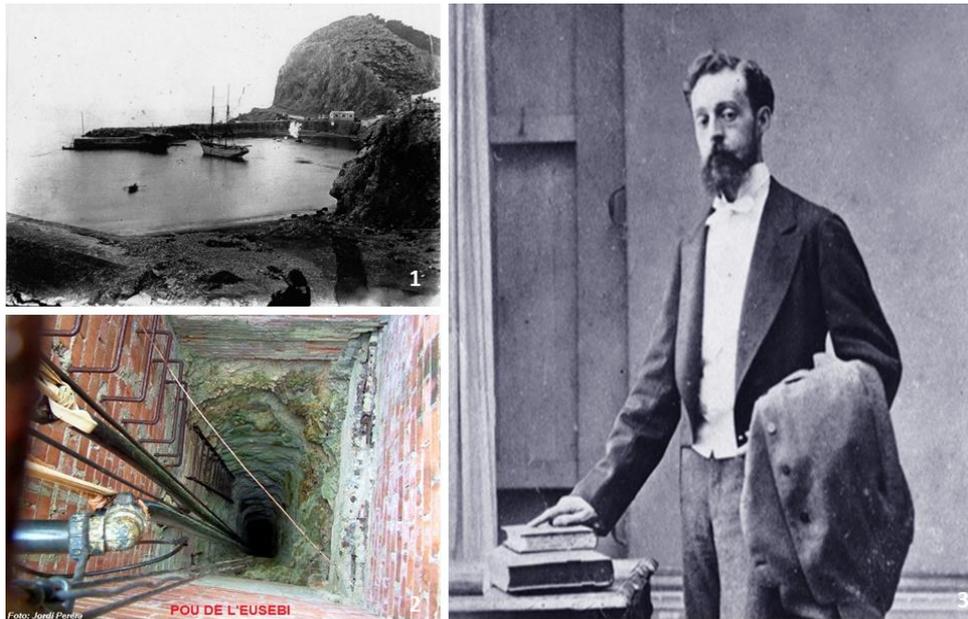


**Figura 36.** Imagen donde se aprecia la ubicación del Puerto Náutico del Garraf y la montaña de la Falconera. Fuente; Google Earth.

### 6.3.1.2. *Historia de la exploración de la cavidad y la problemática de la topografía subacuática*

De todas las cuevas que contiene el macizo del Garraf, sin duda, la que muestra más interés y complejidad es la cova de la Falconera, debido a la sima de 22 metros en vertical que le da acceso desde la parte superior de la roca (Aymamí, 2007). Desde la antigüedad, los pescadores de la costa del Garraf conocían la existencia de diferentes manantiales de agua dulce que brotaban de la montaña y se extendían de manera notoria mar adentro, los cuales eran visibles gracias al cambio de tonalidad del color del agua del mar que provoca la salida de agua dulce (Fig. 37.1). La explicación a semejante fenómeno hay que buscarla en la filtración del agua de lluvia a través de la roca calcárea, que hace que se acumule un gran depósito en los niveles freáticos internos. De hecho, de las diecisiete surgencias conocidas en la costa del Garraf, desde Punta Ginesta hasta el Puerto de Aiguadolç, la más importante es el de la Falconera, ubicada en el Paso de la Mala Dona (Faura y Sans, 1907) (Fig. 37.2).

El hecho de verter al mar más de 85.000 metros cúbicos diarios de agua dulce llamó la atención en 1899 a Eusebi Güell (1846-1918) quien trató de explotar las surgencias de la cavidad para su comercialización, a través de la “Compañía de Aguas de Begues”, y así intentar abastecer de agua potable a la ciudad de Barcelona (Fig. 37.3). Los trabajos y estudios de captación del agua se le encargaron a Silvio Thos i Codina, que excavó cuatro pozos artificiales siendo el más importante el pozo de l’Eusebi, con una profundidad de 60 metros, y diversos túneles en la roca dentro de la montaña. Finalmente, se descubrió que la verdadera fuente de agua estaba dentro de la misma cueva, bajo el nivel del mar, lo que hizo que cuatro años después se abandonara el proyecto, desviando el agua desde Montcada hasta Barcelona para el abastecimiento urbano de agua (Aymamí, 2007).

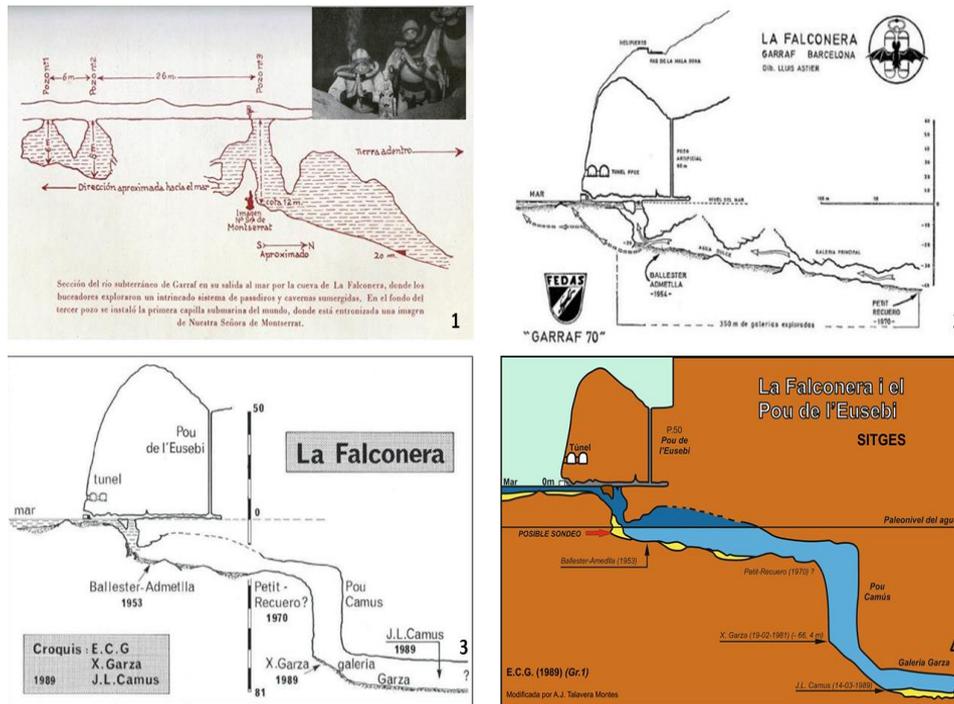


**Figura 37.** Imágenes de la historia de la Falconera. **1.** Puerto antiguo del Garraf con la montaña de la Falconera al fondo. Fuente; Club Nautic Garraf<sup>39</sup> **2.** Pou de l'Eusebi, punto de extracción de agua de la surgencia de la Falconera. Fuente; Jordi Perera (<https://www.espeleoindex.com/>). **3.** Imagen de Eusebi Güell i Gaudí. Fuente; Fundació Antoni Gaudí<sup>40</sup>.

En el año 1953 comenzaron las exploraciones espeleológicas subacuáticas en la cavidad, en las que se fueron realizando una serie de topografías muy básicas que ayudaron a la comprensión de ésta desde un punto de vista técnico, pero no científico. Ese mismo año y, gracias al uso de escafandra autónoma, el espeleólogo Antonio Ballester y el buceador del Centro de Recuperación e Investigación Submarina (CRIS) Eduard Admetlla hicieron la primera inmersión subacuática, alcanzando los 20 metros de profundidad (Fig. 38.1). En 1960 se produjo una exploración subacuática a gran escala llamada “Operación Tritón” y entre 1966 y 1969 se realizan diversas exploraciones hasta llegar a los 30 metros de profundidad (Figs. 38.2 y 39.1). Sin embargo, no fue hasta los años 70 cuando tuvo lugar la campaña “Garraf 70” en la que se recorrieron 350 metros de galerías inundadas y se alcanzaron los 40 metros de profundidad (Marques, 1988; Cardona, 1990; Ferrer, 2006) (Figs. 38.3 y 38.4).

<sup>39</sup> <https://www.clubnauticgarraf.com/es/default/club/content/ini/1/id/historia-ca>

<sup>40</sup> <https://fundacionantoniogaudi.org/eusebi-guell-y-gaudi/>



**Figura 38.** Primeras topografías de la Falconera; **1.** Primera topografía de la cova de la Falconera realizada por E.Admetlla en 1954 donde aparece la sección del río subterráneo del Garraf en su salida al mar. Fuente; (<https://www.espeleoindex.com/>) **2.** Topografía de la cova de la Falconera realizada por el equipo de Garraf 70 de FEDAS. Fuente; Archivo FEDAS. **3.** Croquis esquemático de la cova de la Falconera realizado por el equipo de X.Garza y J.L. Camus del Espeleo Club de Gràcia (ECG) en 1989 . Fuente; Joan Perona (Cardona, 1990). **4.** Croquis esquemático de la cova de la Falconera realizado por Antonio J. Talavera, donde se defiende la hipótesis de la cavidad como punto de aguada. Fuente; (Fumás, 2022a).

En 1972 se inició la construcción del vertedero de basuras de la Vall d'en Joan, cerca de Garraf, y a los pocos años la contaminación del agua de la cova de la Falconera ya era una realidad. A pesar de estas circunstancias, miembros del Espeleo Club de Gràcia (ECG) decidieron emprender de nuevo las exploraciones subacuáticas y en diciembre de 1988, el espeleo-buceador francés Jean Louis Camus y Javier Garza hicieron un primer reconocimiento y, pese a que la visibilidad no superó los 2 metros, se dieron cuenta de la magnitud de la galería (Fig. 39.2).

Poco después, Garza instaló 145 metros de hilo guía a fin de preparar una próxima inmersión con J.L Camus con medios más sofisticados. Ésta se llevó a cabo en enero de 1989 y, sorprendentemente, en contra de lo que hasta ese momento se sabía por la topografía de Petit-Recuerdo, la galería se cerró en su totalidad a los

200 metros; en este punto, un enorme pozo de unos 20 metros de diámetro supuso la continuación en vertical de la cavidad.

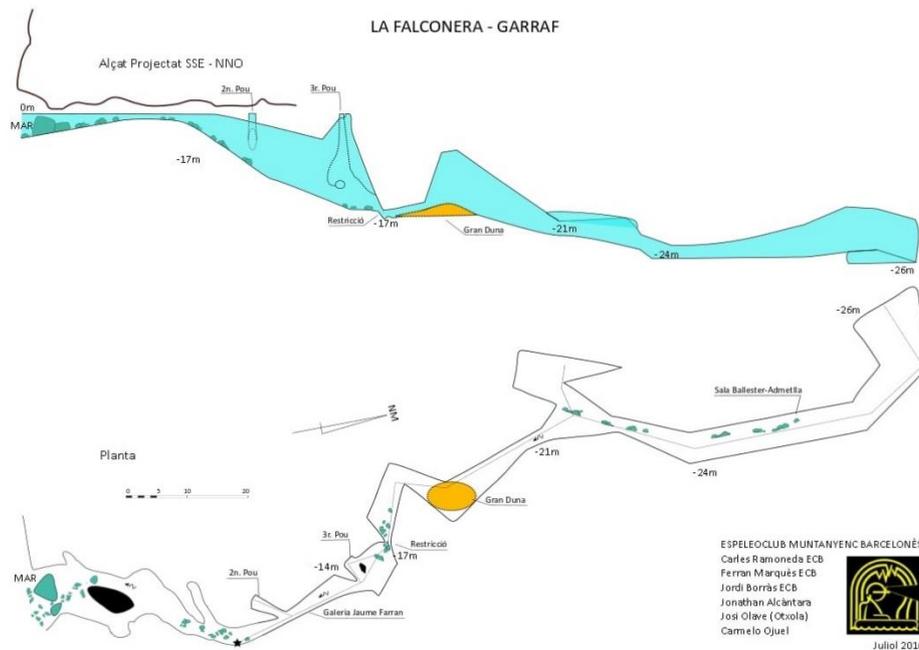


**Figura 39.** Imágenes de las primeras exploraciones en la cova de la Falconera y contaminación del agua; **1.** Primeros espeleo-buceadores en las cuevas del Garraf en el año 1960, F. Villate, A. Carreras, R. Lario, J. Bruguier, (Foto: Ramon Canela, G.E.B). **2.** Campaña de trabajo topográfico de 1989. Fuente; Archivo Espeleo Club de Gràcia (ECG). **3.** Salida de agua dulce contaminada por la boca de la cova de la Falconera (Foto; Josep María Cervelló). **4.** Vertido al mar de miles de toneladas de aguas contaminadas procedentes de los niveles freáticos a través de la surgencia de la Falconera (Foto; Josep María Cervelló).

En marzo de 1989 fue cuando J. L. Camus, con un espectacular equipo con mezcla de gases y oxígeno para realizar la descompresión, inició la inmersión en la galería al fondo del pozo, pero al llegar a los 81 metros de profundidad la falta de visibilidad y un suelo formado por un profundo sedimento fangoso le hicieron desistir y volvió a la superficie sin conseguir la progresión buscada.

Posteriormente, se realizaron nuevas inmersiones, pero ninguna llegó a la importancia de la del año 1989, al tratar de buscar la “misteriosa” Galería Petit-Recuero, sin resultados.

Finalmente, no fue hasta el año 2016 cuando el equipo de espeleobuceo del Espele Club Muntanyenc Barcelonés (en adelante ECMB) formado por Carles Ramoneda, Ferrán Marqués Artero, Jordi Borrás, Jonathan Alcántara, Carmelo Ojuel y Josi Olave (Otxola) realizaron una nueva topografía actualizada de los primeros 140 metros de la cavidad (Fig. 40).



**Figura 40.** Topografía más actual de la cova de la Falconera realizada por el equipo de espeleobuceadores del Espele Club Muntanyenc Barcelonés (ECMB). Fuente; Carles Ramoneda.

Gracias a la reciente topografía del ECMB se pudo analizar y estudiar las posibles áreas de prospección arqueológica en las galerías de entrada a la cavidad. El estudio realizado por el ECMB no solo indicó, aproximadamente, la posición dentro de la cavidad de la primera restricción, ubicada a -17 metros, sino que, también señaló la existencia de una gran duna de arena que, al depender de si la cueva está en carga o descarga del agua acumulada en los niveles freáticos internos de la montaña, obstaculiza el paso a la gran Sala de Ballester-Admetlla, lo que es muy importante dado que modifica de forma considerable la morfología de la cueva, al depositar o extraer toneladas de arena acumuladas en su interior.

La proyección de una ruta de prospección, pretendida por el Proyecto Falconera, no solo necesitaba del conocimiento de una topografía actualizada, sino también

de unas coordenadas tanto de la entrada como de la zona interior que permitieran medir distancias, georreferenciar, geolocalizar y acotar una posible área de prospección arqueológica, la cual debería quedar posteriormente definida sobre un mapa geográfico u ortofotomapa y sobre una topografía clásica. Para esto, se debía mejorar de forma científica la topografía existente con un método que permitiera la visualización 3D de la parte de la cavidad que interesaba prospectar, a la vez que, se debía conseguir unas mediciones mucho más rigurosas y exhaustivas que las consultadas en fuentes anteriores, obtenidas manualmente a través del cálculo de las poligonales de las paredes de la cavidad respecto al hilo guía (Gómez, 2005; Vasseur, 2006; Huber, 2009; Fumás, 2022a).

### 6.3.1.3. Hacia una hipótesis de estudio arqueológico

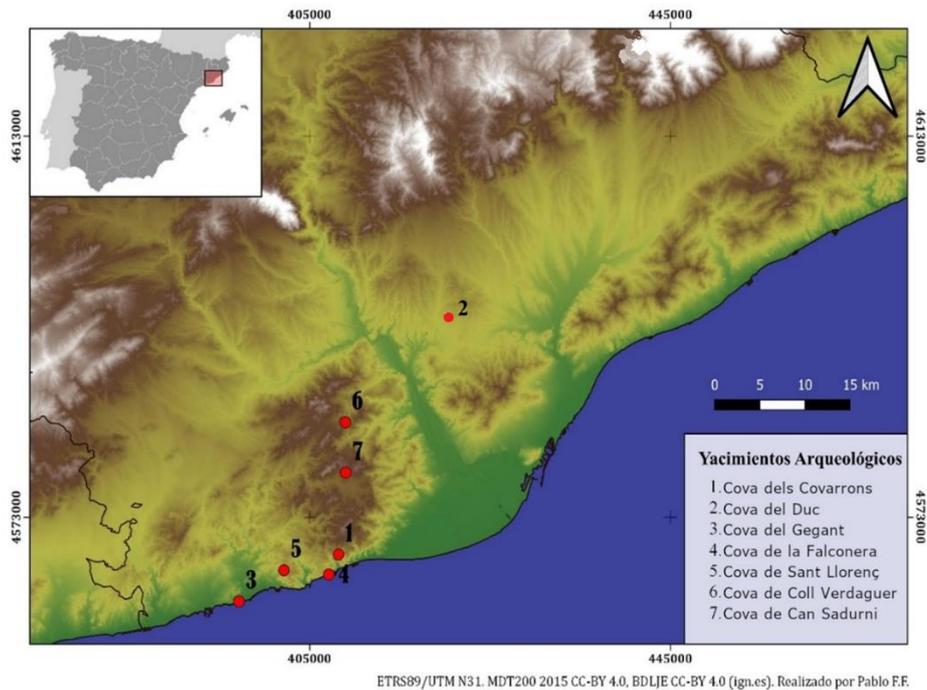
Después de contextualizar la cova de la Falconera, se debía entender la importancia que pudo tener en el pasado prehistórico semejante fuente de agua dulce para los antiguos pobladores del Garraf. Para esto, era necesario responder a la pregunta, ¿dónde investigar?, lo cual equivalía a ¿dónde prospectar? La respuesta a esta pregunta no era sencilla, si no se generaba una reflexión sobre la importancia de esta cueva en la antigüedad y su relación con los hábitats circundantes.

Como hemos comentado, los estudios geológicos sobre las oscilaciones del nivel del mar señalan que el mínimo isostático fue hace unos 25000 años, coincidiendo con el LGM, con un mínimo de -120 metros del nivel del mar por debajo del actual y con las costas alejadas unos 10 km delante del lugar en el que está ahora la línea costera del Garraf (Clark *et al.*, 2009). A partir de entonces, el nivel del mar volvió a subir y consiguió momentos de estabilización en los que se fueron formando los deltas actuales, hasta llegar a la cota actual. En aquel momento, toda la plataforma continental, hoy en día sumergida, era una gran llanura esteparia, la cual formaba un paleo-valle surcado por el río Llobregat, siendo la cova de la Falconera el lugar donde iba a parar toda el agua del llamado Cañón del Foix (Checa *et al.*, 1988; Gàmez, 2007) (Fig. 41).

Con toda seguridad había varias surgencias que seguían el valle, al abrigo del risco de la montaña, en la que se encontraba la Falconera, la cual era una antigua surgencia abandonada, un conducto en seco que podía actuar como surgencia en épocas muy lluviosas. Esta es una de las razones por la que la plataforma marina está cubierta de sedimentación fina, arenas y limos, muy recientes.

La cova de la Falconera podría haber sido una cavidad con una zona interior anegada, quizá, accesible hasta un pozo inundado, al depender del nivel marino, puesto que cuanto más bajo estuviera éste, más abajo entraría el agua interior y más lejos las fuentes relacionadas. Sin duda, en los momentos más húmedos los caudales podían ser importantes y hacer manar la cueva como un aliviadero. La boca de entrada era mayor que ahora y con varios accesos que se unían a la sala que da paso a la parte inundada, por lo tanto, la habitabilidad y la luz dentro de la entrada eran mucho mejores que en la actualidad.

Por otro lado, son abundantes los estudios donde se señala la importancia arqueológica de las cavidades litorales en la península ibérica (Arias, 2020), ya sea como puntos de abastecimiento de agua para navegantes y pobladores cercanos a las surgencias (Ginés y Ginés, 2010; Marlasca y López, 2014), como el caso de la cova de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia, Mallorca) (Gràcia *et al.*, 2001), la cova des Drac de Rafal des Porcs (Santanyí, Mallorca) (Deyà, Colom y Gràcia, 2022) y la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Manacor, Mallorca) (Gràcia *et al.*, 2010) o como cuevas refugio de hábitat temporal, como la cova del Gegant (Sitges, Barcelona) (Daura y Sanz, 2014), la cueva de los Aviones (Cartagena, Murcia) (Montes, 1991), la cueva C6 (Águilas, Murcia) (San Nicolás y Martínez, 1987) o la cueva de Vanguard (Gibraltar) (Stringer *et al.*, 2008). En nuestro caso, y aunque toma fuerza la consideración de un posible uso de abastecimiento de agua dentro de la cavidad, vista la importante actividad de los primeros pobladores del Garraf en su área periférica, la hipótesis arqueológica de la cova de la Falconera tan solo se validaría si en el interior de la cavidad se encontraran indicios de ese uso antrópico, para lo cual sería necesario realizar una serie de sondeos estratigráficos en nuestra área de intervención concreta.



**Figura 41.** Mapa de las cuevas cercanas donde se han encontrado restos arqueológicos alrededor de la cova de la Falconera (Autor. Pablo Fraile).

Teniendo en consideración los diferentes estudios paleo climáticos y de los niveles freáticos, es lógico pensar que el nivel del agua dulce dentro de la cavidad pudiera haber sido el mismo que el nivel del mar, aumentando considerablemente en épocas de fuertes lluvias, cuando las aguas del arroyo de la Falconera se filtraban en la cueva. Así, con esta hipótesis, y siguiendo las directrices de los estudios de Flemming y Moyes (Moyes, 2012; Flemming y Antonioli, 2017), los restos arqueológicos, que se pudieran conservar en el interior de la cavidad deberían permanecer enterrados bajo la capa de arena, en una zona de abrigo de la denominada Galería Jaume Ferran (Fig. 40).

#### 6.3.1.4. *Objetivos propuestos en el proyecto*

Sabedores que la arqueología es una ciencia social de interpretación histórica y la prospección una técnica concreta para obtener datos sobre una investigación, el presente trabajo apostó por reforzar la simbiosis entre topografía y prospección arqueológica.

El objetivo final pretendía conocer la ubicación exacta de una posible área arqueológica, dentro de una cueva sumergida, validándola con la obtención de unas coordenadas que permitieran una posible ubicación espacial de los diferentes restos arqueológicos o paleontológicos (Fumás, 2022b). Pero, para esto, primero se debía cotejar los resultados topográficos obtenidos a través de diferentes mediciones manuales, mediante el uso del cálculo de las poligonales de las paredes de las cavidades respecto al centro de la galería o al hilo guía que la atraviesa, o mediante la utilización de distintos dispositivos electrónicos que facilitaran una lectura comprobada y validada con el resto de los datos obtenidos por las otras técnicas utilizadas. Y, posteriormente, se debía extraer y analizar una serie de sondeos estratigráficos del paleosuelo que nos acotaran, aún más si cabe, el área de un futuro sondeo arqueológico.

Por supuesto, la elección de la búsqueda de verificación de unas coordenadas dependía del valor que se le otorgase a ese punto en concreto. En este caso, sería la probabilidad de encontrar restos arqueológicos bajo el sedimento que cubre el suelo de la cavidad. Para llevar a cabo el objetivo, se necesitaba conocer más sobre el pasado de la cavidad y sobre los estudios que se habían llevado a cabo en esta materia. Por este motivo, se debían seguir las indicaciones de Flemming (Flemming *et al.*, 2014; Flemming, 2020), puesto que él observó que varios factores favorecían la supervivencia arqueológica de los restos arqueológicos durante la inundación de la cavidad, a medida que aumentaba el nivel del mar. Según sus estudios, los factores que favorecen la supervivencia arqueológica incluyen lo siguiente:

- Un gradiente costero bajo, de modo que la acción de las olas se atenúa en la entrada de la cavidad, siempre y cuando haya una construcción portuaria cercana, puesto que la amplitud de onda será mínima, la longitud de las olas corta y la acción de las olas en el fondo marino mínima.
- Una barrera de protección, puesto que todo posible depósito arqueológico en el interior de una cueva solo se conservará si tiene un refugio de rocas caídas de techo, de escombros acumulados, de concreciones, brechas, de formación de conglomerados e inundaciones por viento y arena.

Estos factores pueden servir para asegurar los estratos arqueológicos en el interior. Por lo tanto, antes de realizar cualquier intervención, debemos preguntarnos ¿dónde prospectar? Para dar una respuesta científica rigurosa a esa pregunta, se necesita conocer todos los datos cronológicos, geológicos, hídricos, históricos y arqueológicos del área de intervención, además de la geo posición correcta de la misma.

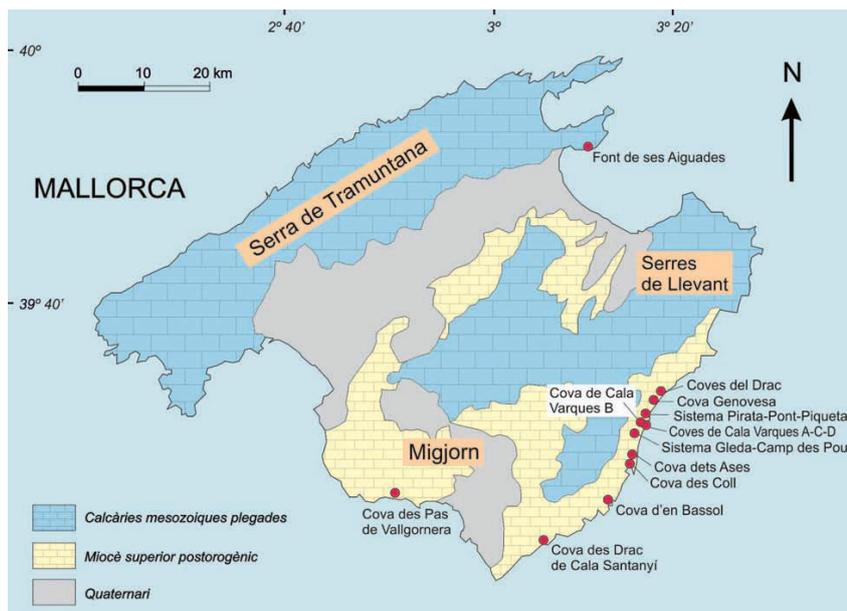
#### 6.4. LA PROSPECCIÓN EN CUEVAS SUMERGIDAS INTERIORES DE AGUA DULCE

##### 6.4.1. El proyecto IASCM

El tercer y último caso a estudio de la presente tesis se llevó a cabo en las cuevas sumergidas de Mallorca, dentro del proyecto denominado Proyecto IASCM (acrónimo de Investigación Arqueológica Subacuática en las Cuevas de Mallorca) codirigido por Manel J. Fumás, el Dr. Francesc Gràcia y el Dr. Florian Huber. Esta investigación buscaba profundizar en el estudio técnico, metodológico y subacuático de las cavidades prehistóricas de Mallorca y, asimismo, conocer más sobre los ambientes cársticos y su relación con los yacimientos arqueológicos terrestres y subacuáticos que le rodean (Higuera, 2018). De este modo, se pretendía saber qué tipo de vínculos tenían las sociedades del pasado entre ellas y sus hábitats (Ramis y Santandreu, 2011).

Los estudios realizados durante los últimos años por la asociación de espeleobuceo Grup Nord de Mallorca (GNM) y posteriormente por la Societat Espeleològica Balear (SEB) habían sacado a la luz no sólo importantes descubrimientos topográficos, biológicos y geológicos, dentro de las cuevas sumergidas, sino también formidables descubrimientos arqueológicos pioneros a nivel estatal. Todos estos hallazgos habían sido descubiertos de manera fortuita a través de las prospecciones llevadas a cabo por los profesionales de la GNM, siendo excepcionalmente documentados en artículos, revistas, artículos y en una tesis doctoral, todos ellos publicados previamente (Gràcia, 2015).

Las investigaciones llevadas a cabo por el SEB en los últimos años se focalizaron en diversas cavidades subacuáticas de la zona del denominado Migjorn oriental de Mallorca; cova des Coll (Gràcia *et al.*, 2005), cova des Drac en Cala Santanyí (Gràcia *et al.*, 1998) y cova des Drac des Rafals dels Porcs (Carbonell *et al.*, 1981; Deyà, Colom y Gràcia, 2022; Gràcia *et al.*, 2022), las de Felanitx; en la cova d'És Dolç (Gràcia *et al.*, 2014), las de la zona de levante en Manacor; cova Genovesa (Gràcia *et al.*, 2003) (Gràcia *et al.*, 2003) y la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Gràcia *et al.*, 2010) y las de la zona norte; como la cova de la Font de Ses Aiguades (Gràcia *et al.*, 2001). Los hallazgos de las piezas arqueológicas que se han llevado a cabo durante las exploraciones son evidencias que muestran los diferentes momentos de uso de las cavidades naturales de Mallorca como lugares para el abastecimiento de agua (Gràcia, 2015) (Fig. 42).



**Figura 42.** Mapa de situación de las cavidades. Se aprecia la concentración de cuevas en el levante y mediodía de Mallorca, especialmente dentro de los materiales del Mioceno Superior postorogénico. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2011).

La presencia de restos arqueológicos dentro de las cuevas, en las pendientes de entrada y bajo las aguas, a veces situadas a cientos de metros de la boca de entrada, en galerías inundadas, han indicado a científicos como Gracia (2015) la ubicación de entradas antiguas, cerradas o cegadas. Esta obstrucción se habría

realizado voluntariamente en tiempos pasados para despedregar los campos vecinos y conseguir aumentar la tierra de cultivo.

El presente estudio, mucho más extenso y completo que los anteriores, detalla los trabajos realizados tanto en la primera campaña prospectiva de 2019 como los trabajos llevados a cabo en la segunda campaña arqueológica oficial del Proyecto IASCM, realizada en octubre de 2020 (Fumás, 2021). La finalidad última es tratar de contextualizar los yacimientos, explicar los trabajos realizados y proponer y definir objetivos futuros de mejora, además de ampliar los estudios metodológicos prospectivos en las cavidades sumergidas.

#### *6.4.1.1. Marco jurídico*

El proyecto de prospección de las cuevas sumergidas mallorquinas siguió la normativa vigente y la legislación pertinente, incluyendo tanto los decretos estatales como las directrices que marcaba la normativa legal del Patrimonio Cultural y de Medio Ambiente de las Islas Baleares; I) Decreto 14/2011, de 25 de febrero, por el que se aprueba la regulación de las intervenciones arqueológicas y paleontológicas de las Islas Baleares (Boib, 37, 12/3/2011) pp. 7-13), II) Ley 12/1998, de 21 de diciembre, sobre el patrimonio histórico de las Islas Baleares, y III) Decreto 14/2015, reglamento de las cavidades declarado ZEC que forman parte del plan de gestión de cuevas. Guías de Conservación de la Red Natura 2000, aprobadas por acuerdo de la Conferencia Sectorial de Medio Ambiente en Materia de Patrimonio Natural y Biodiversidad y recogidas en la resolución de 21 de septiembre de 2011, de la Secretaría de Estado del Cambio Climático. BOE No. 244 10.10.2011 (Plan de gestión de la naturaleza 2000 Cuevas) (Govern de les Illes Balears, 2017).

#### *6.4.1.2. Marco geográfico*

El estudio se ha llevado a cabo en varias cavidades sumergidas situadas en diferentes zonas geográficas de la isla de Mallorca, concretamente en; I) la cova des Drac de Cala Santanyí (Santanyí), II) la cova de la Font de Ses Aiguades

(Alcúdia), III) la cova del Sistema Sa Gleda–Camp des Pou (Manacor) y IV) la cova Genovesa o d'en Bessó en Cala Anguila (Manacor).

Todas estas cuevas con restos arqueológicos y paleontológicos en su interior tienen yacimientos arqueológicos terrestres a su alrededor, los cuales tienen una relación directa, por ser lugares que probablemente se abastecían del agua dulce de las cavidades (Encinas, 2014; Aramburu-Zabala, 2018b).

Estas cavidades, situadas principalmente en las zonas interiores de la isla, pero cerca de la costa de levante, no se ven afectadas ni por corrientes marinas ni por los efectos de la erosión causada por las olas (Ramis y Santandreu, 2011).

Aunque las diferentes cuevas a prospectar tienen una ubicación geográfica alejada unas de otras, el camino hacia ellas es relativamente sencillo, lo que facilitó el acceso a los recursos técnicos, humanos y logísticos necesarios para su estudio arqueológico (Gràcia *et al.*, 2011; Fumás, 2021, 2022b).

#### 6.4.1.3. *Objetivos generales del proyecto de investigación*

En el presente estudio, se fueron realizando mejoras prospectivas progresivas, gracias a la experiencia adquirida en los proyectos anteriores y a la incorporación de un equipo humano profesional, en cada uno de los ámbitos y temáticas concretas de los que constaba el proyecto. Además, tuvo como objetivo principal formular propuestas concretas y sólidas para la consecución de una metodología prospectiva firme aplicada a la arqueología subacuática (Delgado, 2000) en entornos confinados, donde la seguridad, la prevención ambiental y la mejora de las técnicas empleadas en espeleobuceo fueran elementos fundamentales. Por último, el objetivo adicional de esta investigación era obtener un conocimiento general de la fragilidad del entorno, proteger posibles yacimientos arqueológicos sumergidos en la isla de Mallorca y dar un impulso metodológico a la arqueología prehistórica subacuática en cuevas sumergidas y semisumergidas dentro del ámbito de la prospección (Ministerio de Cultura, 2009).

El objetivo histórico de esta investigación pretendía obtener más información sobre el uso antrópico de las cavidades sumergidas, sobre el modo de vida de sus pobladores, sobre la necesidad de recursos hídricos y alimentarios, sobre sus

relaciones, sus métodos de comunicación, sus creencias y representaciones artísticas y su abastecimiento alimenticio, o agricultura y ganadería estabulada (Ramis y Santandreu, 2011).

#### *6.4.1.4. Historia de la investigación y la exploración mallorquina*

Las evidencias sólidas sobre el poblamiento más antiguo en Mallorca datan alrededor del III milenio a.C., momento en el cual empiezan a generalizarse las ocupaciones humanas (Ramis *et al.*, 2002). Desde entonces, en la isla de Mallorca, el nivel del mar ha presentado pequeñas oscilaciones, que probablemente conducen a que parte de las cuevas que actualmente encontramos inundadas ya lo estuvieran en el pasado, hecho que comporta la imposibilidad de que estos primeros pobladores las utilizaran como hábitat o espacio doméstico. Como hemos comentado con anterioridad, durante el último estadio glaciario, y especialmente durante el máximo glaciario (LGM), el nivel medio del Mediterráneo descendió hasta valores que oscilan los -100 a -140 m respecto a la actualidad (Clark *et al.*, 2009). Desde entonces, la tendencia general ha sido el calentamiento y la consecuente transgresión marina que ha contribuido a inundar las cuevas del litoral de Mallorca, donde sus formaciones carbonatadas han permitido que se desarrolle un importante sistema cárstico (Ginés *et al.*, 2012). Por este motivo, la mayor parte de las cuevas que hoy encontramos inundadas en la isla de Mallorca, presentaban las mismas características tanto en la prehistoria como en época histórica (Flemming, 2017).

La historia de las diferentes intervenciones y fases de exploración arqueológicas en las cavidades mallorquinas ha quedado plasmada en diferentes obras y artículos bibliográficos con un registro excepcional. La tesis doctoral del Dr. Francesc Gràcia, es una de las obras de síntesis más importantes la cual resume, desarrolla y enumera cronológicamente las diferentes intervenciones realizadas en las cavidades mallorquinas desde los años 90 del siglo pasado (Gràcia, 2015).

Uno de los primeros trabajos que se publicaron fue en 1995, cuando salió a la luz el artículo “Arqueologia de les Cavernes de Mallorca”(Gusó, 1995) en un volumen editado por la Federación Balear de Espeleología y la Sociedad de

Historia Natural de las Islas Baleares, en el que se enumeraban las diferentes intervenciones arqueológicas realizadas en cuevas y abrigos rocosos de la isla. En el año 2011 fue cuando los hallazgos e investigaciones realizadas fueron actualizadas y publicados en una nueva monografía de la publicación ENDINS denominada “Arqueologia de les Cavernes de les Illes Balears” (Ramis y Santandreu, 2011). Este trabajo recopilatorio trata sobre la ocupación de las cuevas en la Edad del Bronce inicial y sobre la minería del cobre, la cual se introdujo durante los inicios de la prehistoria mallorquina, gracias a los descubrimientos arqueológicos efectuados en la sierra de Tramuntana. También, en esta obra, se abordan el tema del uso funerario de las cuevas durante el Bronce Inicial y Medio donde destaca los trabajos arqueológicos de la cueva terrestre de Can Martorellet, la excavación de la cova del Mussol y la cova des Càrritx, conocidas por su uso ritual o ceremonial que junto con la cova des Pas que permitieron conocer más sobre la necrópolis en el interior de las cavernas durante el Bronce Final (Ramis y Santandreu, 2011).

Por último, con cronologías más recientes destaca el uso de las cuevas como punto de abastecimiento de agua y como refugio de la población en período islámico durante la conquista cristiana del siglo XIII (Marlasca y López, 2014).

Es por esta razón que, los trabajos arqueológicos efectuados en los últimos años nos señalan el importante papel que han jugado las cuevas mallorquinas, siendo clave el estudio de éstas para la reconstrucción del pasado histórico de las Islas Baleares (Bernat i Roca, 2001; González, 2002; Juan, 2005; Ramis y Santandreu, 2011; Gràcia, 2015; Fumás, 2021; Deyà, Colom y Gràcia, 2022).

#### *6.4.1.5. Distribución geográfica de las cuevas con restos arqueológicos*

Durante las últimas décadas son diversas las cuevas sumergidas de la zona oriental de Mallorca que se han explorado y topografiado, documentando en algunas de ellas restos arqueológicos y paleontológicos importantes. Todos los hallazgos de diferentes piezas arqueológicas evidencian el uso de estas cavidades naturales como lugares utilizados para el abastecimiento de agua (Gràcia *et al.*, 2001, 2003, 2010, 2014; Gràcia, 2015). La ubicación de estos yacimientos

arqueológicos sumergidos, en los cuales se podían encontrar restos cerámicos, madera, piedra trabajada o huesos de animales, se situaban en la misma entrada sumergida de la cueva, entre la pendiente de rocas procedentes del desprendimiento de la propia bóveda de la cámara rocosa o a causa de la introducción antrópica de rocas, procedentes de los campos de cultivo colindantes (Gràcia, 2015). Además, en el caso de la cova Genovesa, se encontraron elementos arquitectónicos ciclópeos sumergidos bajo el agua (Gràcia *et al.*, 2003). Esta tipología arquitectónica parece justificar el uso ritual o ceremonial de estas cavidades, a mediados del II milenio antes de Cristo, ya que existe constancia de que este tipo de arquitectura no está relacionada con la vivienda o las prácticas funerarias (Ramis y Santandreu, 2011).

La importancia de las cuevas para las comunidades humanas antiguas de Mallorca era considerable puesto que un gran porcentaje de éstas han conservado hasta nuestros días abundantes restos cerámicos. Debemos considerar este tipo de hallazgos como algo notorio puesto que el expolio y la degradación actual de las cuevas han hecho desaparecer gran cantidad de elementos arqueológicos de su interior (Picornell, 2012; Sánchez, 2013).

Sabemos que cuevas como la de Es Drac en la Cala Santanyí fueron utilizadas desde tiempos prehistóricos puesto que bajo sus aguas se han recuperado recipientes cerámicos pre talayóticos y morteros de piedra medievales (Gràcia *et al.*, 2014). En otras cuevas, como la cova des Drac des Rafal des Porcs, en 1996, bajo las aguas del lago se descubrieron restos cerámicos de diferentes cronologías, desde jarras púnicas, recipientes post talayóticos, ánforas romanas y hasta cerámica indígena (Deyà, Colom y Gràcia, 2022; Gràcia *et al.*, 2022). La razón debemos buscarla en la aridez de las tierras circundantes a la cavidad siendo el único lugar donde abastecerse de agua potable (Gràcia, 2015).

Respecto a las cuevas del denominado Migjorn occidental, como la cova de es Dolç, en s'Esfondrat, donde se han recuperado ánforas del tipo MGS V, también llamadas greco-italicas arcaicas de la variante LWA, con cronologías desde finales del siglo IV hasta principios del siglo III a.C. Y en la zona de levante se encontraron fragmentos cerámicos pre talayóticos, púnicos e islámicos bajo las aguas de la sala de entrada de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou y en

dos salas interiores derrumbadas a cientos de metros de la entrada principal (Gràcia, 2015; Fumás, 2022b).

#### 6.4.1.6. Contextualización cronológica e histórica de los yacimientos arqueológicos

Hasta la fecha la cronología más antigua y consensuada para las ocupaciones humanas de las cuevas mallorquinas respecto a los hallazgos sumergidos debemos situarla en el Bronce Medio (c. 1700/1600-1300/1200 a.C.), correspondiente al período denominado pre talayótico o cultura de las navetas, según las diversas propuestas existentes (Gi y Rossell, 1963; Guerrero, 1996; Ramis y Santandreu, 2011; Gràcia, 2015; Aramburu-Zabala, 2018b).

Por otro lado, el origen de la arquitectura ciclópea doméstica se sitúa cronológicamente en las fases iniciales de poblamiento insular, desarrollándose como una cultura autóctona en todo el archipiélago balear (Aramburu-Zabala, 2018b) con construcciones en el interior de cuevas (Gràcia *et al.*, 2003). Esto nos señala la importancia de éstas, en el ámbito relacionado con las prácticas habitacionales o funerarias, debiendo contemplar la idea de un posible significado ideológico para las comunidades indígenas que habitaban la isla durante el II milenio a.C. (De Mulder, 2020), mientras que los restos cerámicos, procedentes de estas cuevas nos señalan una homogeneidad cultural, pudiéndose enmarcar en la fase final de la cultura de las navetas (Gràcia *et al.*, 2003).

Respecto al contextualización arqueológica de los restos arqueológicos procedentes de cavidades sumergidas en la etapa final de la prehistoria mallorquina correspondiente al talayótico o post talayótico final o Segunda Edad del Hierro (600/500 a.C. hasta el siglo I a.C.), que se caracteriza por la presencia de restos cerámicos foráneos, debido a una serie de importaciones de materiales provenientes de intercambios con pueblos colonizadores (Ramis *et al.*, 2002). Esta situación es causada por un conjunto de cambios probablemente interrelacionados en un entorno de creciente jerarquía social e influencias de las diferentes potencias que luchan por el control del Mediterráneo occidental, finalizando esta etapa con la conquista romana de la isla en el año 123 a.C. (Járrega y Colom, 2019). Este es

el caso de los restos encontrados en la cova d'Es Drac des Rafal des Porcs en Santanyí (Gràcia, 2015; Deyà, Colom y Gràcia, 2022; Gràcia *et al.*, 2022).

La ocupación humana en tiempos históricos destaca por el uso de las cuevas como punto de abastecimiento de agua, aunque esta era una actividad ya consolidada desde los inicios de poblamiento insular (Marlasca y López, 2014). Por último, cabe destacar también el uso de las cuevas durante la cronología musulmana en la isla durante la conquista cristiana de Jaume I (Bernat i Roca, 2001). Además de los datos obtenidos en la cova de Els Amagatalls (Trias, 1981) y en la cova des Moros (Trias, 2000) destaca el excepcional descubrimiento de la cova d'en Xoroi (Artà). No obstante, los materiales cerámicos más importantes encontrados bajo el agua fueron las jarras islámicas localizadas en la cova de la Font de Ses Aiguades (Colom y Járrega, 2020; Fumás *et al.*, 2022), la cova Genovesa (Gràcia *et al.*, 2003), la cova de Es Coll (Gràcia *et al.*, 2005) y la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Gràcia *et al.*, 2007) atestiguan la presencia musulmana, sobre todo almorávide y almohade en las cuevas.

#### *6.4.1.7. Cavidades con hallazgos arqueológicos en las que no se ha intervenido*

Gracias a décadas de investigación por parte de espeleo buceadores del Grup Nord Mallorca (GNM) y de la Societat Espeleològica Balear (SEB) sabemos que, hasta la actualidad, en la isla de Mallorca, hay un total de ocho cuevas sumergidas donde se han documentado restos arqueológicos.

En nuestro caso, aunque solo intervenimos en cuatro de ellas, debemos mencionar los yacimientos arqueológicos en el resto de las cavidades, sin profundizar en la historia de la exploración de éstas, ya que es importante contextualizar la importancia de las cuevas sumergidas en el pasado.

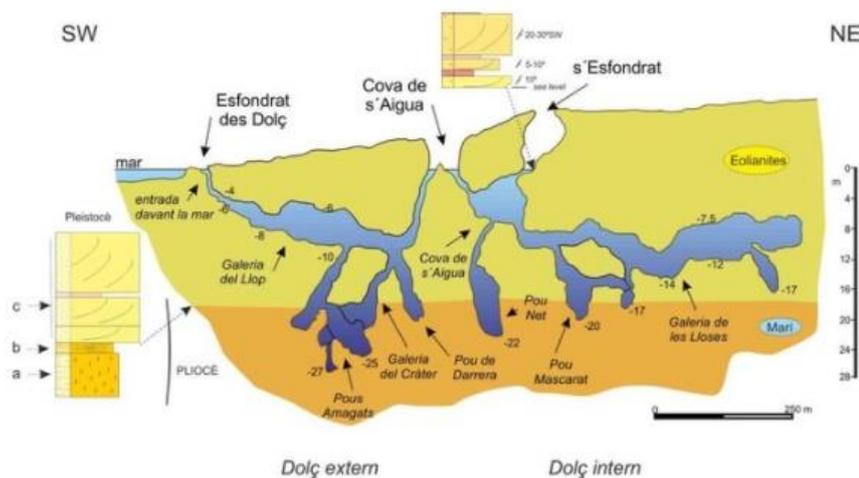
##### *6.4.1.7.1. La cova des Dolç*

La cova des Dolç se encuentra ubicada dentro de la finca de Sa Vall en la localidad de Colonia de Sant Jordi en el municipio de Ses Salines. En esta cavidad

el GNM encontró un ánfora en la pendiente en la entrada de la denominada Sala de l'Esfondrat, concretamente a 3 metros de profundidad (Fig. 43).

La estabilidad en las condiciones ambientales del lugar donde se encontró la pieza ayudó de manera considerable a su conservación in situ con valores de salinidad de entre 15 y 25‰, lejanos a los valores de agua de mar (aproximadamente 35‰), mientras que la temperatura del agua se mantenía constante alrededor de los 19°C. La pieza recuperada formaba parte de un grupo de ánforas denominadas magnogriegas (MGS) que cronológicamente datan entre los siglos V y II a.C. Los principales centros de producción estaban ubicados en las colonias helénicas de Sicilia y en el sur de la península italiana.

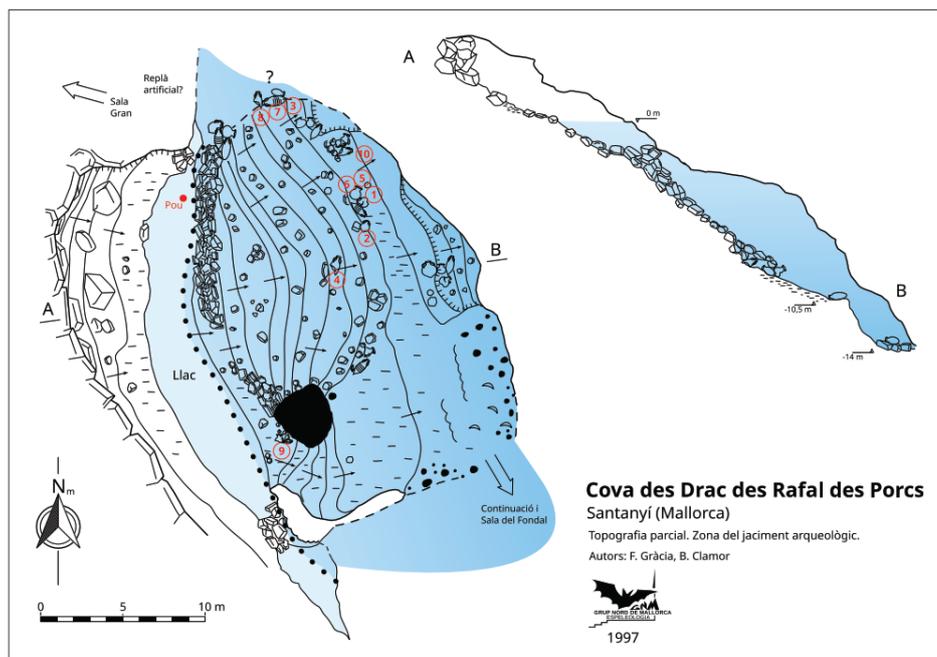
De este modo, y tras el estudio cerámico se llegó a la conclusión de que esta pieza cerámica equivaldría al tipo MGS V, también denominada greco itálico arcaica de la variante Lwa (Gràcia *et al.*, 2014). Este tipo de producción cerámica abarcaba cronológicamente desde finales del siglo IV hasta principios del siglo III a.C. y es frecuente encontrarla diseminada por todo el Mediterráneo porque eran numerosos los centros de producción, ya que se usaban para envasar y transportar vino (Gràcia, 2015; Járrega y Colom, 2019).



**Figura 43.** Perfil topográfico de la cova des Dolç. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2014).

#### 6.4.1.7.2. La cova des Drac des Rafal des Porcs

Esta cavidad es una de las que tienen más importancia de la isla (Gràcia, 2015), debido a la gran cantidad de cerámica encontrada en su interior. La cueva fue objeto de una excavación de emergencia en 1996 por parte del Grup Nord Mallorca (GNM) en colaboración con el Grupo de Arqueologia Subacuàtica (GAS), ya desaparecido. Los materiales recuperados en dos campañas de trabajo fueron cerámica post-talayótica, ánforas itálicas Dressel y frascos púnicos, todos ellos, posiblemente, relacionados con los asentamientos talayóticos de Punta des Baus. La cueva sufrió un fuerte expolio que hizo que los propietarios de la finca donde se encuentra ubicada la cavidad bloquearan la entrada (Carbonell *et al.*, 1981; Deyà, Colom y Gràcia, 2022; Gràcia *et al.*, 2022) (Fig. 44).

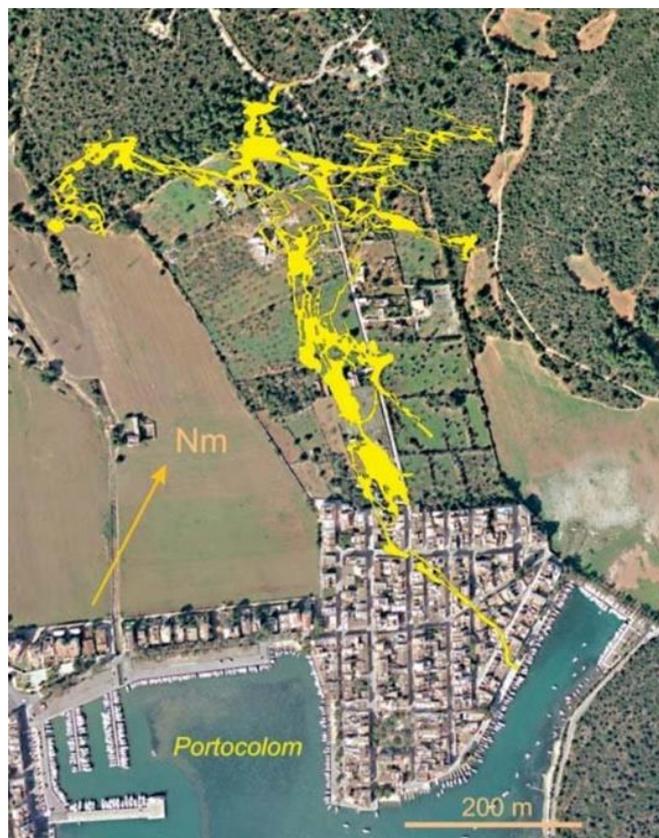


**Figura 44.** Planta y sección del depósito arqueológico realizado en 1997 por Francesc Gràcia y Bernat Clamor, con la ubicación de las piezas cerámicas recuperadas. Fuente; (Deyà, Colom y Gràcia, 2022).

#### 6.4.1.7.3. La cova des Coll

La cova des Coll está situada en la localidad de Felanitx y tiene actualmente una longitud total de 7.020 metros, de los cuales 5.529 metros están bajo el agua. Actualmente, tiene dos entradas naturales y dos pozos artificiales que conectan directamente con la cueva. Una de las entradas comunica con el mar y la otra se encuentra en su interior (Gràcia *et al.*, 2005) (Fig. 45).

De su parte interna se recuperaron diferentes materiales arqueológicos de época romana como fragmentos de ánfora y un molino de piedra. Estos restos se localizaron concretamente bajo las aguas de la denominada Sala Esperada, en el sector de l'Esfondrament. Tras analizar la topografía de la cueva, el equipo de exploración contextualizó históricamente el yacimiento encontrado en esta sala, en lo que sugería ser una antigua entrada cegada. Esta sería la razón del hallazgo de piezas cerámicas en esa ubicación (Gràcia, 2015).

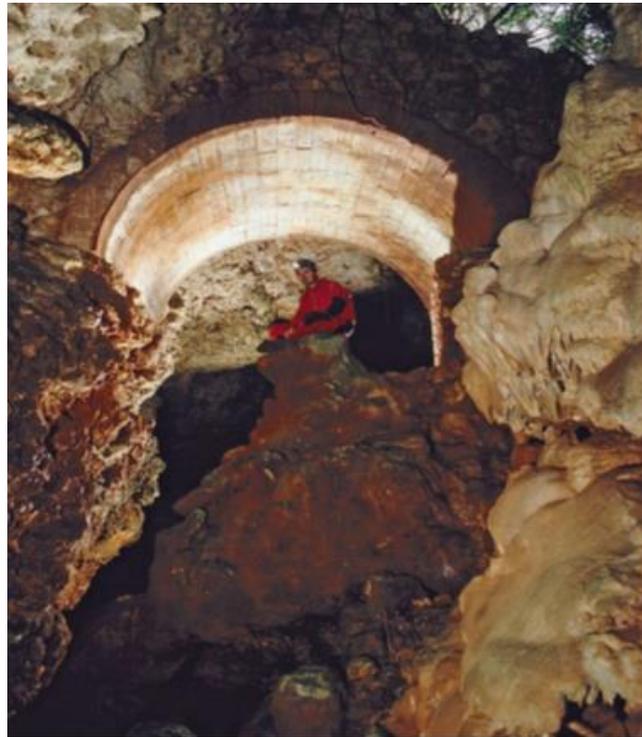


**Figura 45.** Imagen de la topografía de la cova des Coll sobre ortofotomapa (Felanitx, Mallorca). Fuente;(Gràcia *et al.*, 2005).

#### 6.4.1.7.4. La cova del Sistema Pirata Pont-Piqueta

En el término municipal de Manacor y, concretamente, en la carretera que une Portocristo con Portocolom encontramos la cova des Pont-Piqueta, la cual lleva el nombre del puente que existe en la entrada. Se trata de un puente de cronología desconocida y que presenta una bóveda de piedra arenisca tallada y piedra seca.

En el interior de la cueva también se han encontrado restos de materiales cerámicos, concretamente una olla del siglo XVII escondida entre grandes bloques de piedra derrumbados en el cono sumergido de la entrada (Gràcia *et al.*, 2011) (Fig. 46).



**Figura 46.** Cova de Pont-Piqueta donde aparece el puente de acceso a la cueva el cual podría datarse cronológicamente su construcción en el siglo XVII, si aceptamos como coetáneo los materiales cerámicos encontrados en la entrada de la cavidad. Fuente;(Gràci *et al.*, 2006; Gràcia, 2015).

El recorrido actual del sistema de cavidades es de 3020 m, de los cuales 600 m son acuáticos aéreos y 1190 metros totalmente subacuáticos. La distancia máxima en línea recta que separa los extremos entre la cova de Sa Piqueta y la cova del

Pirata es de 512 m. La dirección general del conjunto de cavidades parece ser aproximadamente NW- SE, aunque la coalescencia de derrumbes le han conferido un aspecto caótico. Hay 13 lagos principales más otros muchos marginales que suponen una superficie total estimada de 5000 m<sup>2</sup> (Gràci *et al.*, 2006).

#### 6.4.1.8. Cavidades con restos arqueológicos en las que se ha intervenido

A continuación, pasamos a enumerar las cuatro cuevas con restos arqueológicos en su interior donde se ha intervenido durante las diferentes campañas de prospección arqueológica subacuática llevadas a cabo por el Proyecto IASCM.

##### 6.4.1.8.1. La cova des Drac de Cala Santanyí

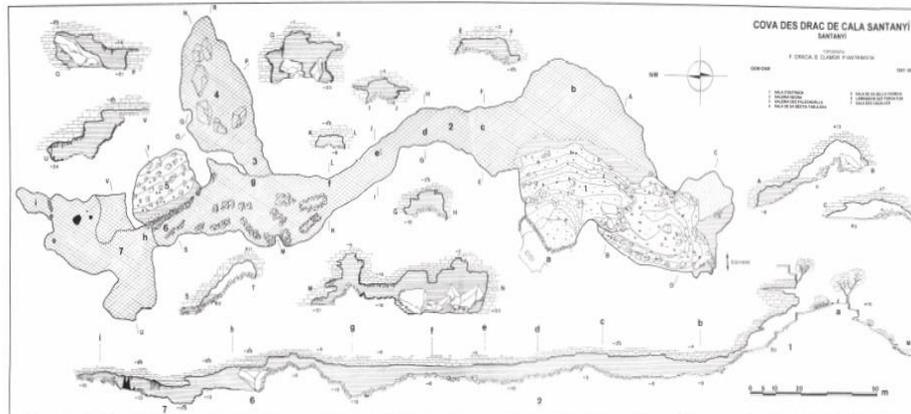
La cova des Drac de Cala Santanyí, UTM 31N, X: 5128001, Y: 4353630.15, se encuentra entre Cala Figuera y Cala Llombards y constituye la desembocadura del Torrente d'en Romeguera de 31,8 km<sup>2</sup> de cuenca hidrográfica. La cueva se encuentra junto a la cala, a 15 m sobre el nivel del mar (Gràcia *et al.*, 1998).

La cavidad tiene un recorrido poligonal de 1005 metros, los cuales se dividen entre 239 metros terrestres y 766 metros subacuáticos y consta de cinco áreas principales. De ellas, la primera está formada por el vestíbulo de entrada, el segundo lo determina la Galería Negra, la parte más larga de la cavidad; a un lado de ésta comienza la Sala de la Bestia Fabulosa y posteriormente aparece la Sala de la Bella Fadrina para, finalmente, llegar una zona de derrumbe de difícil acceso denominada Laminadora del Purgatorio que conduce a la Sala des Cavaller (Gràcia *et al.*, 1998) (Fig. 47).

La cova des Drac de Cala Santanyí ya se utilizaba desde la época pretalayótica. Muchos de los restos arqueológicos que se encontraban en la zona sumergida del vestíbulo de la sala de la entrada fueron expoliados en las últimas décadas.

Todos los indicios señalan que durante la antigüedad reciente la cueva tuvo un uso continuado, ya fuera como punto de abastecimiento de agua o de refugio, puesto

que existe la presencia en la ladera de rocas de acceso al lago de una gran cantidad de huesos de animales, entremezclados con las piedras (Fig. 47).



**Figura 47.** Topografía de la cova des Drac de Cala Santanyí . Fuente: (Gràcia *et al.*, 1998).

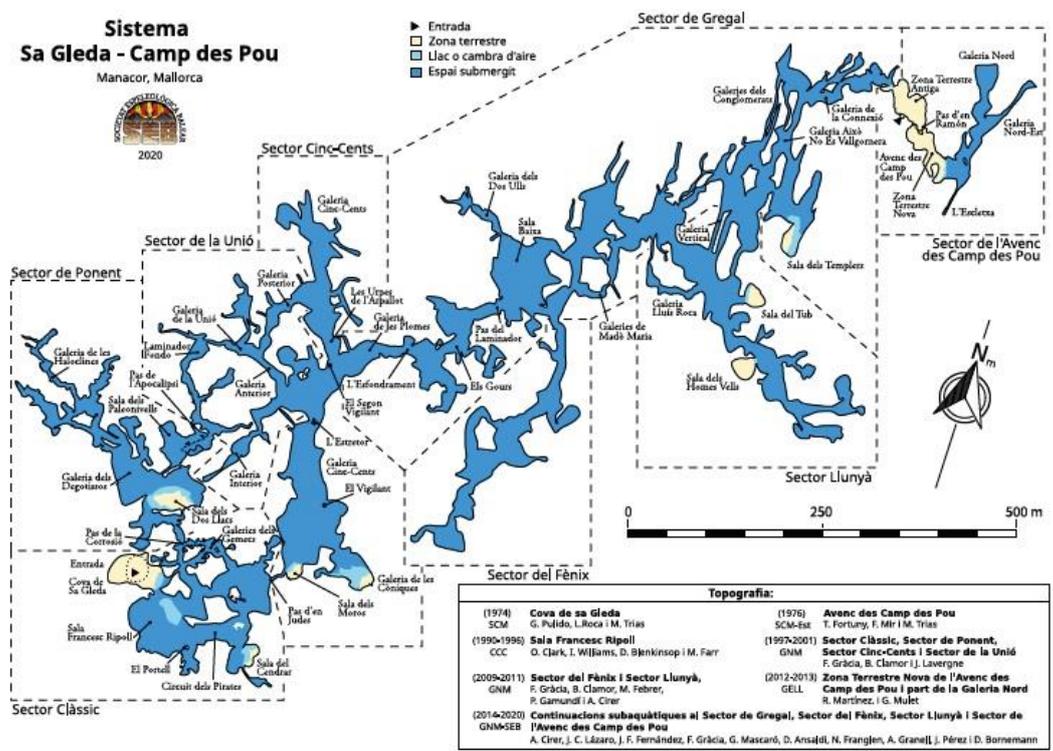
#### 6.4.1.8.2. La cova del Sistema Sa Gleda–Camp des Pou

La cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou, UTM 31N, X: 523805, Y: 4372315,36, se encuentra en la zona oriental de la isla de Mallorca, muy próximo a la localidad de Manacor, concretamente, en la propiedad de Son Josep Nou, a 36 m sobre el nivel del mar y a una distancia aproximada del litoral de 1.7 km (Fig. 48).



**Figura 48.** Ubicación geográfica y perfil de entrada de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2010).

La entrada a la gruta está ubicada en medio de un torrente que drena las aguas que desembocan en Cala Magraner (Gràcia Lladó *et al.* 2010). El recorrido total de la cavidad es de 14620 m, de los cuales, 13720 m son subacuáticos y 900 aéreos, mientras que la profundidad máxima, con respecto al nivel actual del mar, es de 25 metros aproximadamente. La dirección predominante de la cueva es SW-NE, aunque muchas de las galerías se prolongan en diferentes direcciones. La cavidad está aproximadamente a unos 36 m sobre el nivel del mar y su entrada se encuentra ubicada en una torca cárstica que da acceso a su entrada principal en la zona E, ocupada por un lago (Gràcia Lladó *et al.* 2007) (Fig. 49).



**Figura 49.** Topografía actual de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2020).

El trabajo espeleológico realizado por el GNM se desarrolló entre 1997 y 2010, y se centró en aspectos geológicos, biológicos y arqueológicos (Gràcia *et al.*, 2010). En lo referente a los datos arqueológicos, se recuperaron distintos fragmentos de cerámica pre talayótica, púnica e islámica en la Sala de Entrada y en diversas

cámaras interiores de la cueva, producidas por colapsos internos, a unos 200 m, 250 m y 380 m del lago de entrada. Estas cámaras colapsadas reciben el nombre de Sala de los Moros y Galería de las Cónicas, actualmente, sin salida al exterior (Gràcia *et al.*, 2011).

En la actualidad, sabemos que la cavidad tiene dos entradas, la principal se encuentra en la finca Son Josep Nou de Manacor, la cual es el lugar de más fácil acceso, y la segunda está en la sima des Camp des Pou, con una acceso en vertical mucho más complejo (Gràcia *et al.*, 2010). El resto de las entradas están cegadas y algunas de ellas son difíciles de localizar desde la superficie, como es el caso de la entrada secundaria a la Sala de los Moros.

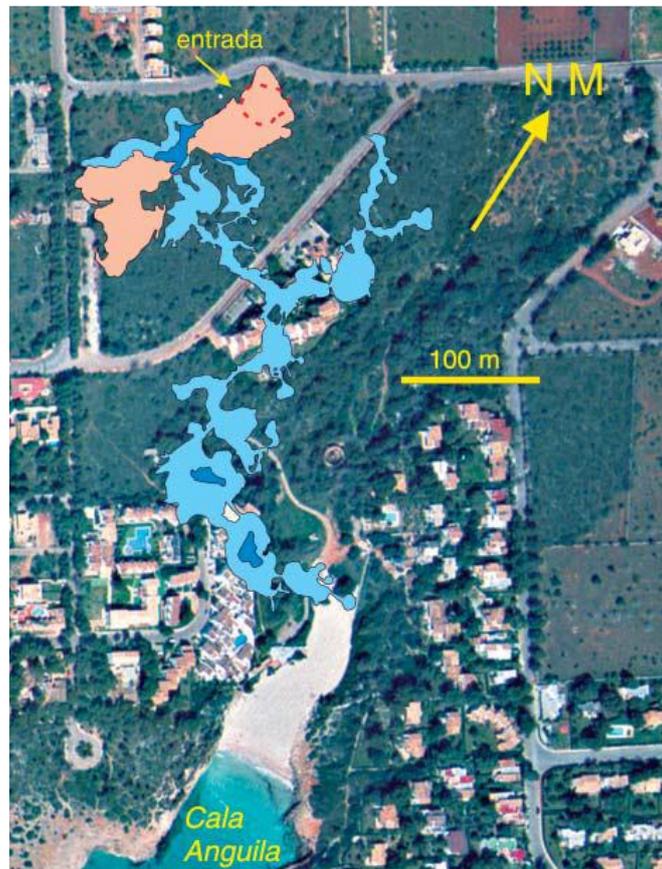
La cavidad llama la atención por sus diferentes estructuras exteriores, ubicadas en la entrada terrestre de la cueva, relacionadas con la extracción de agua, pudiendo encontrar desde pozos, ruedas hidráulicas, bombas de agua y hasta canales excavados. Todo esto es posible gracias a la construcción de un camino helicoidal que desciende hasta la cueva y da acceso al lago de la entrada. En este pequeño lago del vestíbulo de la entrada se encontraron diferentes fragmentos cerámicos pretalayóticos, púnicos e islámicos y también en dos zonas colapso y derrumbe internos, a unos 200 m, 250 m y 380 m de la entrada. Estos derrumbes correspondían a las zonas denominadas Pas d'en Judes, Sala de los Moros y Sala de las Cónicas, correspondientes a antiguas entradas a la cavidad actualmente cegadas (Gràcia *et al.*, 2010).

#### 6.4.1.8.3. *La cova Genovesa o d'en Bessó*

##### 6.4.1.8.3.1. *Descripción geográfica e histórica*

La cova Genovesa o d'en Bessó, UTM 31N, X: 527243,33, Y: 4374377,93, se encuentra en Manacor. Concretamente el acceso de entrada se encuentra en la calle Leonardo da Vinci, en la urbanización de Cala Anguila (Fig. 50). Durante las últimas décadas la cavidad ha sido elemento de estudio de diversos proyectos de exploración e investigación de diferentes ramas científicas sufriendo, a la vez, una grave contaminación de sus aguas a causa de la filtración de aguas fecales de

origen desconocido. La cueva fue inspeccionada por primera vez en 1973 por M. Trias, T. Fortuny y F. Ruiz, miembros del Espeleo Club Mallorca (SCM), aunque no fue hasta 1988 cuando los espeleo-buceadores galeses Steve Ainley y Owen Clarke hicieron la primera inmersión, unos 60 metros en dirección oeste. Bajo sus aguas se han encontrado elementos arquitectónicos ciclópeos, restos de cerámica de diferentes cronologías y huesos de *Myotragus balearicus* (Gràcia *et al.*, 2003).



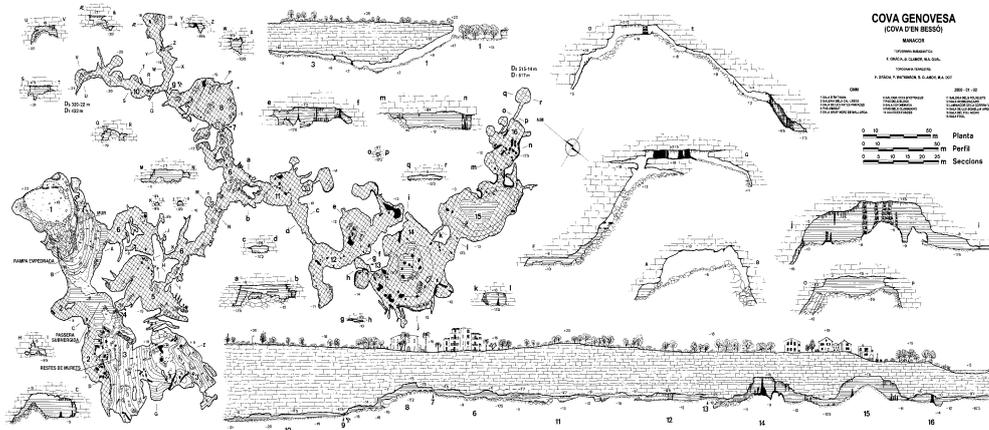
**Figura 50.** Topografía de la cova Genovesa o d'en Bessó sobre ortofotomapa. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003).

La cueva de dirección NW-SE tiene una distancia aproximada de 2447 metros, de los cuales 1845 metros están bajo el agua, con una profundidad máxima de 22 metros. La entrada a la cueva está a 23 metros sobre el nivel del mar y tiene una apertura de 35 metros de diámetro. Al final de la rampa de entrada se encuentra el lago, que tiene 14 metros de largo (Gràcia *et al.*, 2003).

#### 6.4.1.8.3.2. Contexto arqueológico

Siguiendo la descripción de Gràcia (2003) en su publicación sobre la cova Genovesa (Gràcia *et al.*, 2003), éste definía la cueva como una cavidad donde se habían documentado diferentes elementos arquitectónicos construidos con técnica ciclópea. En su interior se destacaban; I) una rampa de piedra que descendía desde la entrada terrestre hasta el lago de la cueva, II) una pasarela sumergida en el lago que conectaba con la zona seca del interior y III) una pared ciclópea paralela a la rampa. Además, se encontraron 107 fragmentos de cerámica prehistórica, datada en la fase final de la cultura Navetas. Por otro lado, se destacaba la ausencia de elementos cerámicos característicos de otros periodos prehistóricos anteriores o posteriores.

De este modo, podemos ubicar el período de uso prehistórico de la cova Genovesa en un rango cronológico que puede incluir gran parte de la segunda mitad del II milenio a.C. y los dos primeros siglos del primer milenio (Gràcia *et al.*, 2003) (Fig. 51).

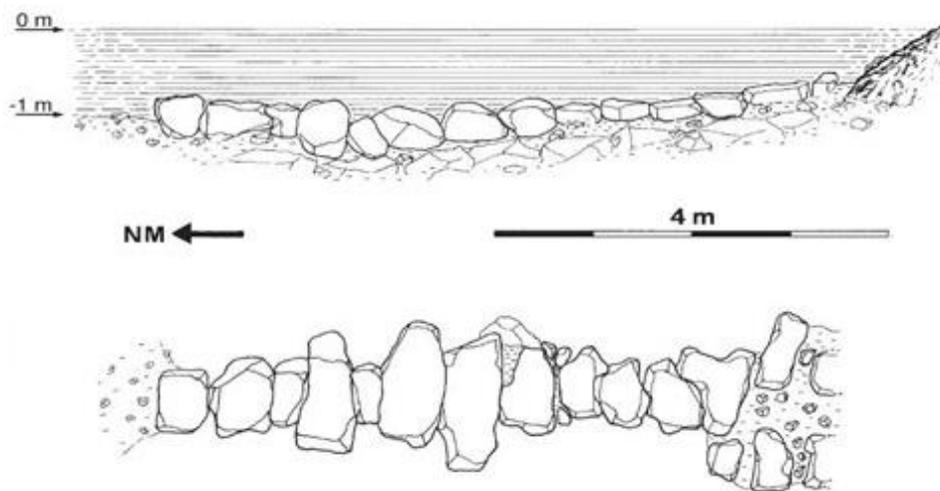


**Figura 51.** Topografía de la cova Genovesa realizada entre los años 2000 y 2002 por Francesc Gràcia, Bernat Clamor y Miguel Ángel Gual de la SEB. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003).

En su publicación Gràcia (2003) afirmaba también que la mayoría de los tipos de cerámica descritos eran recipientes que podían estar relacionados con la presencia de agua dulce en el interior de la cavidad. De este modo, los restos arqueológicos fueron datados en las siguientes etapas prehistóricas; I) el Bronce final y la

Primera Edad del Hierro (1300/1200-600/500 a.C.), con el inicio y la consolidación de los cambios más importantes que dieron lugar a la formación de la cultura talayótica y II) en la etapa final de la prehistoria mallorquina, en la segunda Edad de Hierro y durante las colonizaciones (600/500 a.C. al siglo I a.C.), que se caracterizan por un conjunto de cambios probablemente interrelacionados en un entorno de crecimiento en la jerarquía social e influencias de las potencias que luchaban por el control del Mediterráneo occidental. Esta etapa será interrumpida por la conquista romana de la isla en 123 a.C., que sería el equivalente al talayótico final o post-talayótico (Gràcia *et al.*, 2003).

Según Gràcia (2003), la construcción del muro de piedra, actualmente sumergido, sólo se pudo construir en un momento en que el nivel de las aguas subterráneas estuvieran un metro por debajo de su nivel actual. Además, los estudios del nivel marino durante el Holoceno indican una pequeña disminución del mar en la época de la Navetas que pudo ser utilizado para su construcción (Gràcia *et al.*, 2003; Vacchi *et al.*, 2018) (Fig. 52).



**Figura 52.** Muro sumergido debajo del agua en la entrada de la cova Genovesa. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003).

En base a los datos previos y a los restos cerámicos recuperados, así como la pasarela de piedra, la cova Genovesa se presenta como una cavidad relevante para el estudio de las cuevas sumergidas en Mallorca. De este modo, eran muchas las preguntas que se podían formular tras la lectura del artículo publicado por Gràcia

(2003), tanto metodológicas como históricas. Es por esto por lo que, el Proyecto IASCM centró los esfuerzos en la parte paleontológica y en la parte arquitectónica sumergida de la cueva, la cual podría considerarse única por las características tan especiales que tiene esta cavidad.

La cova Genovesa no tiene, actualmente, ningún tipo de protección frente al público en general, encontrándose en medio de una urbanización muy frecuentada por turistas y visitantes que descienden frecuentemente hasta el lago de la entrada. Esto sin duda dificulta cualquier tarea analítica que se precie, puesto que el poco material arqueológico encontrado entre las rocas y guijarros está completamente destruido y descontextualizado (Ruiz, 2013).

#### 6.4.1.8.4. *La cova de la Font de Ses Aiguades*

##### 6.4.1.8.4.1. *Descripción geográfica e histórica*

La denominada cova de la Font de Ses Aiguades, UTM 31N, X: 501021.46, Y: 4413637.02, se encuentra en el NE de Mallorca, en la bahía de Alcudia, cerca del islote de Alcanada (Fig. 53). La cueva tiene acceso a través de un pozo que se encuentra a 6 m de altura sobre el nivel del mar y está ubicada en una ladera de pendiente suave desde el mar hasta el interior que continúa hacia el Puig de Sa Madona de 169 m de altura.

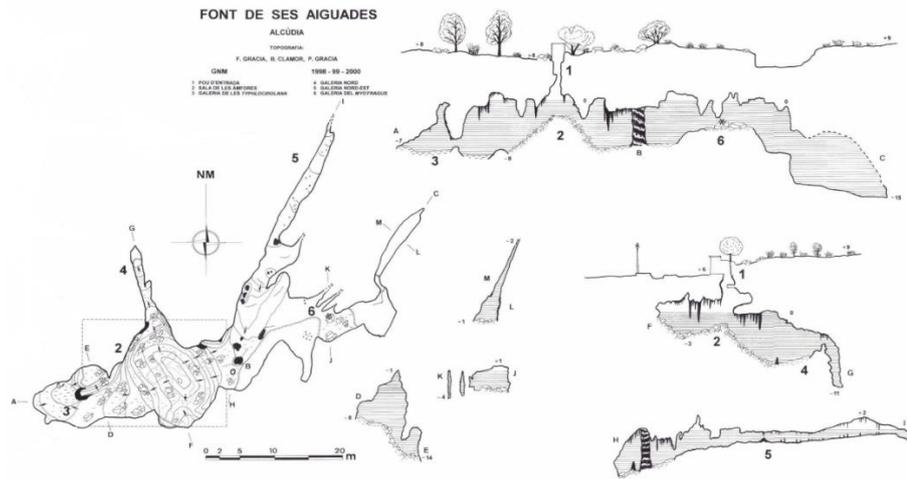
Desde tiempos antiguos la zona era ya muy frecuentada por navegantes, como lo demuestran los diversos restos arqueológicos sumergidos que todavía se conservan bajo el mar en la Bahía de Alcanada (Gràcia *et al.*, 2001). El pozo de acceso apenas se encuentra situado a cien metros de la orilla del mar, en una bahía en la cual era habitual el fondeo de barcos a lo largo de los siglos, puesto que se encontraba a pocos kilómetros de la antigua ciudad de Pollentia, que junto con Palma eran los centros de difusión de la romanización en la isla (Munar y Sastre, 2010; Giaime *et al.*, 2017). La cavidad, hasta la construcción del campo de golf de Alcanada, iniciado en 1998, estaba en una zona de mucha vegetación de pinos que la escondía del tránsito actual de coches, bañistas y caminantes.



**Figura 53.** Mapa geográfico con la ubicación de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; Adaptación (Colom y Járrega, 2020).

La cueva, predominantemente dirección NE-SO, consta de un conjunto de galerías (Galería de la Moraguesi Typhlocirolana, la Galería NE, Galería dels Myotragus y la pequeña Galería Nord) que convergen entre sí en la Sala de las Ànfores, siendo esta la zona más amplia. El polígono proyectado de la cavidad tiene un desarrollo total de 180 m, de los cuales la mayoría están bajo el agua, sin embargo, son abundantes las cámaras de aire esparcidas por toda la gruta (Gràcia *et al.*, 2001).

Gràcia (2001) en su estudio definía el cono de escombros del yacimiento arqueológico, entendido éste como un montículo de rocas y sedimento sumergido creado por los depósitos de materiales lanzados desde la zona de aguada. Este tiene una superficie proyectada de unos 200 m<sup>2</sup>, con un volumen aproximado de 63.25 m<sup>3</sup> desde la cima hasta -7.5 metros de profundidad. El cono comienza desde unos -2 m bajo el agua hasta -14 m en la conocida como Sala de les Ànfores llegando hasta el interior de la Galería de la Moraguesi Typhlocirolana, siendo ésta la parte más rica en material, algo lógico ya que la propia morfología del cono hizo que al caer las piezas en el agua rodaran hacia abajo hasta que chocaban con la pared de la cueva o con un obstáculo que detuviera el descenso hasta adquirir la horizontalidad (Gràcia, 2001) (Fig. 54).



**Figura 54.** Topografía de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2001).

#### 6.4.1.8.4.2. El yacimiento arqueológico

La cova de la Font de Ses Aiguades es una cavidad de depósito indirecto, es decir, es una cueva donde en la antigüedad nunca se vivió, debido a la diferencia cronológica entre la aparición de los primeros habitantes en la isla, alrededor de 3500 a.C. y el comienzo mucho más temprano de la inundación de las cuevas al final del Pleistoceno (Ramis *et al.*, 2002). La cueva desde tiempos inmemoriales sirvió como punto de abastecimiento de agua para los antiguos pobladores de la isla y para los barcos que fondeaban en ese lugar para llenar y almacenar el agua necesaria para continuar su viaje por el Mediterráneo. Aunque, no fue hasta la época romana, gracias a la proximidad del puerto de Pollentia, cuando la cavidad tuvo la máxima repercusión como parada obligatoria, tanto de los pobladores locales como de los navegantes que recorrían el Mediterráneo en la antigüedad (Gaiame *et al.*, 2017; Járrega y Colom, 2019).

Las similitudes entre la cerámica encontrada en la cavidad con la transportada en los diferentes barcos durante las travesías mediterráneas guardan un paralelo riguroso, lo cual se puede cotejar con los diferentes talleres alfareros de la Hispania Tarraconense (Colom y Járrega, 2020). Además la fácil identificación del islote de Alcanada que sita en frente de la ubicación donde se encuentra Ses Aiguades era una referencia fácil de avistamiento desde el mar, lo cual facilitaba el reconocimiento de la costa por parte de los marinos (Gómez, 2018).

Actualmente, la entrada de la cavidad está cerrada por un pozo y tiene muchas modificaciones y construcciones que la han afectado a lo largo de períodos muy espaciados en el tiempo. Hay una primera sección vertical de unos 4 m de pozo con una escalera metálica fija, en mal estado, que conduce a un rellano donde la sección del pozo es sólo unos 90 x 60 cm. Desde este lugar al agua hay una caída vertical de 2 m, sin ninguna estructura que permita bajar en este momento. Cerca del agua hay un pequeño rellano que aparentemente ha jugado un papel útil en algún momento de la historia del pozo, ya que presentó algunos fragmentos de cerámica (Gràcia *et al.*, 2001).

A finales de los años 90, el equipo de Grup Nord Mallorca (GNM) perteneciente a la Federación Balear de Espeleología dirigida por el Dr. Gracia y los espeleobuceadores Bernat Clamor, Joan Josep Lagverne, Josep Vega, Antoni Merino y Guillem Mulet, extrajeron un total de 189 piezas de cerámica, la mayoría de ellas ánforas producidas en diversos talleres cerámicos de la Provincia Hispania Tarraconensis, concretamente en la zona de Iaietana (Gràcia *et al.*, 2001; Colom y Járrega, 2018, 2020). El material fue encontrado enterrado y mezclado con piedras y barro, y bajo grandes bloques rocosos, troncos de plantas y huesos de animales que los cubrían parcialmente. El lanzamiento de piedras y estructuras dentro del pozo, tales como picas y bloques de piedra dio lugar a la rotura de gran parte de las piezas, que por lo general se hundían en su totalidad (Fig. 55).



**Figura 55.** Ánforas extraídas de la cavidad a finales de los años 90. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2001).

La mayoría de las ánforas romanas recuperadas eran recipientes de vino amortizados, que cronológicamente se ubicarían alrededor de los siglos II a.C. Entre ellas había piezas griegas tardías (entre los siglos II al I a.C.) de la tipología Dressel 2-4, ánfora 10, ánfora 21 de tipología de Dressel bética 7-11, ánfora 24, Dressel-1 tipo cursiva del siglo I a.C. con asas planas.(Nieto y Santos, 2010; Gràcia, 2015; Colom y Járrega, 2020).

La cova de la Font de Ses Aiguades es sin duda la cueva con mayor importancia arqueológica de Mallorca. Con toda probabilidad ésta servía como referencia en el abastecimiento de agua, formaba parte de una red de puntos de aguada repartidos por las costas e islas mediterráneas que hacían imprescindible su conocimiento por parte de los marinos y comerciantes antiguos (Marlasca y López, 2014).

El gran número de restos de cerámica antigua, casi todos pertenecientes a contenedores utilizados para la recolección de agua, todavía siguen enterrados y sumergidos en su interior. El problema aparece cuando se pretende realizar una clasificación rigurosa de los mismos puesto que los restos cerámicos de los contenedores más modernos se encuentran entre los más antiguos, lo que hace muy difícil tanto la contextualización histórica como la precisión cronológica de los momentos de uso de la cavidad, siendo necesario un estudio exhaustivo de todo el yacimiento y de cada una de las piezas cerámicas sumergidas remanentes en su interior (Colom y Járrega, 2018).



# **CAPÍTULO 7**

# **RESULTADOS**

*Lo propio del saber no es ni ver ni demostrar, sino interpretar.*

Michel Foucault (1926- 1984)

## **7. RESULTADOS**

Las diferentes intervenciones técnicas y metodológicas ejecutadas en los distintos tipos de cuevas sumergidas generaron una gran cantidad de información que debía ser contextualizada y clasificada dependiendo de las variantes cársticas, de inundación, geológicas, arqueológicas y paleontológicas. De este modo, pasamos a enumerar los resultados obtenidos en las diferentes actuaciones realizadas en las cavidades semisumergidas y sumergidas, los cuales fueron aumentando en dificultad a medida que los trabajos de campo iban generando datos sobre la metodología utilizada, donde la finalidad última era la generación de un protocolo de actuación básico que pudiera modificarse según el contexto de intervención.

### **7.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS CUEVAS DEL GARRAF**

#### **7.1.1. La cova de la Xarxa**

La prospección visual de la pequeña cueva, con apenas veinte metros de recorrido, nos permitió observar una cavidad colapsada con un techo rocoso bajo y un depósito de arena que se introducía hasta la parte más interna de la misma. La cova de la Xarxa, por su morfología y orientación hacia sur, es una cavidad que presenta buenas condiciones de habitabilidad, sin embargo, esta misma orientación la expone directamente a la erosión del oleaje marítimo. Por otro lado, el colapso de rocas bloquea totalmente la cavidad imposibilitando cualquier progresión hacia una galería interna. Esto provocó que fuera imposible continuar con cualquier tipo de prospección arqueológica subacuática superficial, debido a la exposición directa de esta cavidad a los factores erosivos mencionados y a la aparición de un manto rocoso compacto que hacía completamente imposible la introducción manual de un sondeo estratigráfico.

### 7.1.2. La cova del Congre

Tras una exhaustiva prospección visual, tanto terrestre como subacuática, encontramos una cavidad estéril desde el punto de vista arqueológico. Posiblemente, la cova del Congre tenga un desarrollo superior hacia el interior de la montaña que podría desvelar el origen del manantial de agua dulce que mana en la oquedad vertical ubicada a nivel del mar, pero la gran cantidad de rocas que colapsan por completo todo el alzado de la cueva impiden reconocer cualquier material antrópico que nos desvele el uso humano de la cavidad como refugio o hábitat en la antigüedad (Fig. 56).



**Figura 56.** Imagen desde la zona inferior donde se aprecia la gran acumulación de rocas pigmentadas de forma natural. (Foto. Autor).

Ciertamente llamó la atención el gran número de pinturas rojizas repartidas por las paredes y techos de toda la caverna. Normalmente, en las cuevas la inmensa mayoría de los colores parietales se deben a la presencia de materiales orgánicos en los precipitados. El caso más frecuente es el de aportes de ácidos húmicos y fúlvicos que proceden de la descomposición del suelo y que dan lugar a tonalidades ámbar, amarillentas o marrones. Parte de las coloraciones se deben a la presencia de iones metálicos en la red cristalina de los precipitados y en este caso las rojizas de las pinturas podría ser provocado por la existencia de distintos iones de óxido e hidróxido de hierro (Artiaga, Gibert y García-Veigas, 2015) (Fig. 56).

En nuestro caso, durante el proceso de estudio, se analizaron cientos de fotografías tomadas en las paredes y bloques de roca con el programa “Image J” en busca de patrones y manifestaciones pictóricas de arte prehistórico que testimoniaran el uso de esta cavidad litoral, pero no se encontró el más mínimo indicio de éstas (Martínez, 2010).

Respecto a la prospección arqueológica subacuática, ésta no permitió encontrar una zona o área viable para un posible sondeo arqueológico debido a que el suelo rocoso sumergido estaba compactado y erosionado por el oleaje. La cova del Congre presenta un panorama poco halagüeño en lo que se refiere a la continuidad en la prospección arqueológica. La necesidad de extraer gran cantidad de rocas para encontrar el paleo suelo de la cavidad o la falta de una continuidad de desarrollo de las galerías hacia el interior de la montaña, tanto terrestres como subacuáticas, hace casi imposible su estudio, sino se genera un proyecto económicamente importante que permita el uso de una logística adecuada en el traslado del material y un equipo humano experto en el uso de herramientas neumáticas para la realización de sondeos estratigráficos en suelos rocosos.

### **7.1.3. La cova del Pebre**

Nos encontramos con una cavidad con una casuística muy parecida a la cova del Congre, donde la erosión marítima ha desvanecido cualquier posible indicio arqueológico. Las cavernas o cuevas litorales de poca longitud presentaban una

dificultad añadida en su acceso y en los posibles trabajos arqueológicos a realizar. La posibilidad de realizar un sondeo bajo la capa de rocas y cantos rodados era realmente compleja debido al continuo oleaje que azotaba de manera continua la entrada de la cueva. La documentación tomada en nuestro estudio tan solo consistió en cerciorarnos de la realidad ya señalada en investigaciones pasadas donde la fuerza del mar impide la existencia de un registro arqueológico en su interior.

## 7.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CUEVA SEMISUMERGIDA DEL GEGANT

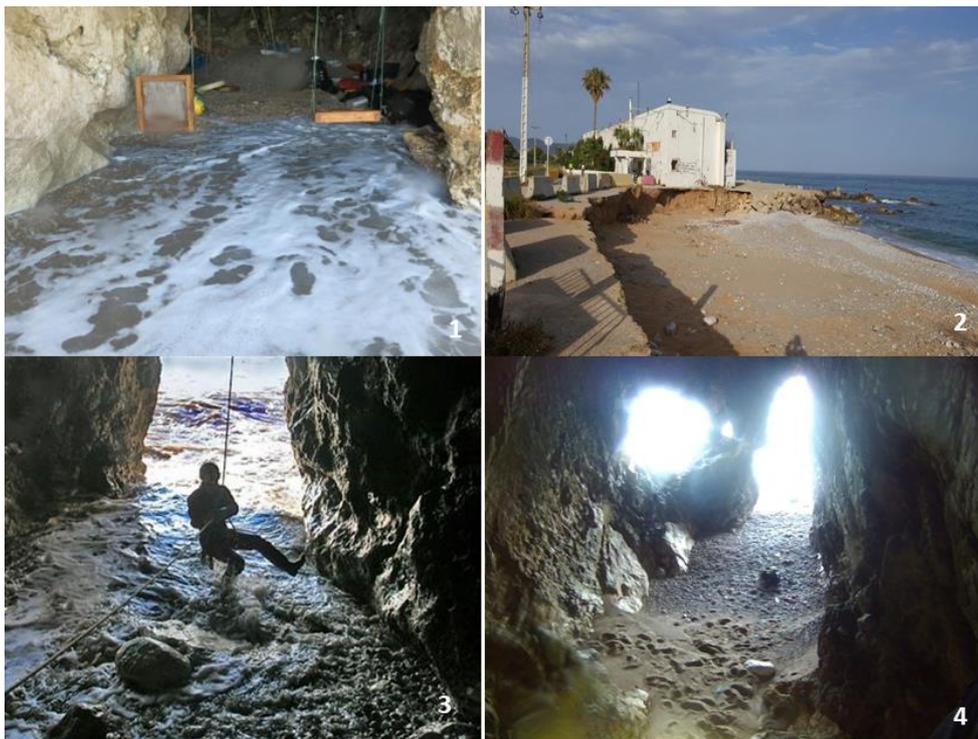
La primera intervención arqueológica subacuática se realizó en la entrada sumergida de la cova del Gegant y tuvo como finalidad ampliar el conocimiento de la investigación que se estaba llevando a cabo dentro de la misma cueva por parte del equipo del SERP (Fig. 57.1). El objetivo final era el de realizar un transecto entre la entrada y la zona exterior más alejada y sumergida de la misma, para finalmente llevar a cabo una prospección visual que nos permitiera saber dónde sería mejor sondear y donde había acumulaciones sedimentológicas diferenciadas en la estratigrafía definida.

La coyuntura climatológica vivida en el año 2017 era ideal, ya que hubo una serie de tormentas que azotaron la costa de Sitges durante el invierno, produciendo una extracción natural de sedimentos, lo cual fue de gran ayuda para poder trabajar en el levantamiento y extracción de sedimentos en la parte exterior sumergida. En aquel momento, las olas habían retirado más de un metro de sedimento de la costa, haciendo que la prospección visual y la extracción de sedimentos fueran mucho más fáciles de obtener (Fig. 57.2).

Es habitual que las cuevas del litoral del Garraf y de la Punta de les Coves sufran, constantemente, un proceso constante de erosión y depósito de sedimentos formados por arenas y cantos rodados movidos por las corrientes de fondo y la fuerza del oleaje. Es por esta razón que, las intervenciones programadas en el presente estudio solo tenían sentido si se realizaban en momentos donde la capa sedimentaria era mínima, ya que una gran depósito o colmatación de arena en los

estratos sedimentarios nos hubiera alejada de nuestro objetivo que era la localización de restos arqueológicos mediante la extracción de testigos sedimentarios.

En realidad, la dinámica costera nunca afecta a todos los lugares ni a todas las épocas por igual. Por ejemplo, en el año 2017, en la playa de Sitges se tuvieron que dragar toneladas de arena desde el fondo marino hasta la playa para poder habilitarla para el uso turístico mientras que, en el caso de la cova del Gegant, la dinámica costera actuó inversamente dejando el interior de la cavidad con más de dos metros de grava y sedimento arenoso, lo que supuso que ese año el equipo de arqueólogos del SERP pudiera trabajar cómodamente en el interior de la cavidad y, en nuestro caso, los trabajos subacuáticos tuvieran un buen rendimiento de ejecución al no tener apenas sedimento depositado sobre la parte de la costa que pretendíamos sondear (Figs. 57.3 y 57.4).



**Figura 57.** Imágenes de la cova del Gegant y alrededores; **1.** Imagen de la entrada al vestibulo de la cova del Gegant donde el equipo de arqueólogos del SERP trabaja en la parte terrestre. (Foto. Autor). **2.** Imagen de la playa al lado de la antigua discoteca Atlántida situada en el denominado Cap de Grills. Sitges. (Foto. Autor). **3.** Cova del Gegant. Año 2015 (Foto. Joan Daura) **4.** Cova del Gegant. Año 2017 (Foto. Autor).

### 7.2.1. Resultados topográficos y arqueológicos

En el estudio de la parte exterior sumergida, el gran inconveniente con el que nos encontramos fue conocer la geo posición, lo más aproximada posible, del área de prospección. Para ello se debía acotar una zona viable de intervención, lo más cercana al vestíbulo de la cavidad, al ser ésta la posible zona de actividad durante la antigüedad (Moyes, 2012).

El hecho de no disponer de un dispositivo GPS adecuado, para conocer las coordenadas del área donde se colocó la cuadrícula subacuática que servía como referencia espacial, hizo necesario que la prospección se completara con una triangulación desde la entrada de la cueva hasta la zona de trabajo, en lo que se denomina triangulación de cuadrícula dispersa (Izaguirre, 2010). Con el objetivo de facilitar las tareas de triangulación en una zona sumergida con oleaje y poca visibilidad se optó por la colocación previa de varias piquetas señalizadas que facilitarían la orientación de los buzos en sus mediciones subacuáticas (Fig. 59.1).

De este modo, tras realizar la triangulación desde el vestíbulo de la cueva hasta el área de intervención subacuática (Piqueta número 9) a 7.6 metros y a 1.5 metros de profundidad, se colocó una primera cuadrícula de trabajo, que tuvo que ser retirada poco después ya que las juntas entre los tubos se rompieron debido a la fuerza de las olas (Figs. 59.2 y 59.3).

En el caso de los trabajos realizados durante la prospección visual con cuadrícula georreferenciada se pretendía encontrar la mejor ubicación para la realización de un sondeo manual que nos permitiera llegar a los sedimentos marinos. Gracias a las condiciones naturales favorables de retirada de sedimento arenoso, en la parte exterior sumergida del vestíbulo a causa del oleaje, se trató de hacer un sondeo manual extrayendo las rocas y guijarros superficiales, aunque éstos estaban fuertemente cimentados imposibilitando su extracción. A este problema debíamos añadirle el aumento del viento a 10 nudos, que aumentó el oleaje y el sedimento en suspensión en el agua, perdiendo progresivamente la visibilidad. Además, las olas agitaban la cuadrícula rompiendo las juntas de unión, lo cual obligó al equipo a repararlas continuamente, provocando una fatiga en los buceadores y un

esfuerzo suplementario, consumiendo más aire de las botellas en un intento de arreglarlas (Fig. 59.3).

Esto nos hizo ser conscientes de que, toda intervención subacuática debía tener muy presente los factores meteorológicos y el oleaje marino, teniendo presente los datos obtenidos de plataformas como la de windguru<sup>41</sup> y sabiendo que las primeras horas de luz del día eran las mejores antes que la denominada “térmica” o aumento de la temperatura del aire y del mar aumentara el oleaje contra las rocas.

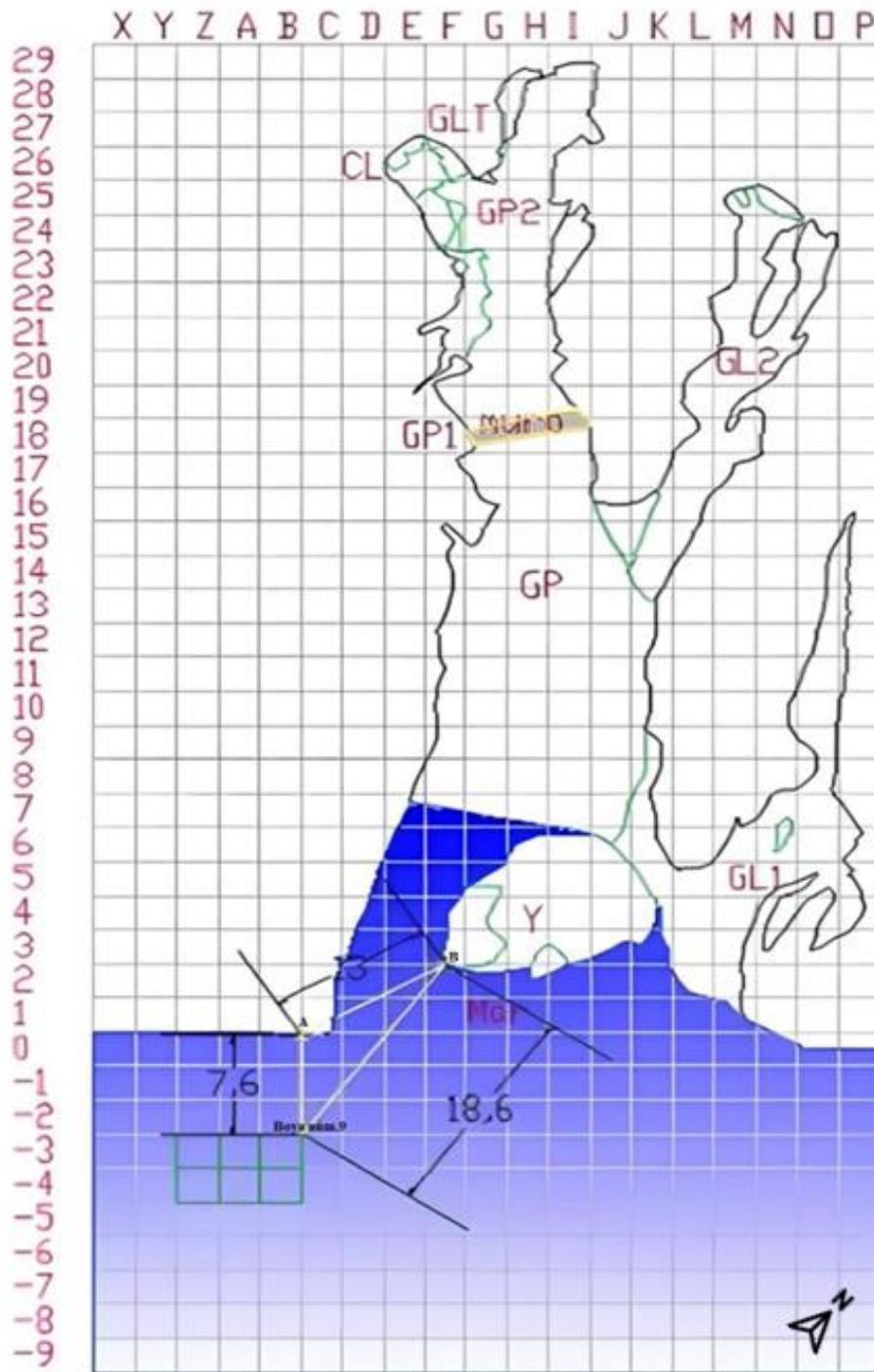
Tras la colocación de nuevo de la cuadrícula de trabajo, se llevó a cabo la nivelación para conseguir la correcta medición de los tres ejes (X, Y, Z). Dada la imposibilidad de encontrar las coordenadas exactas, se optó por georreferenciar la cuadrícula de trabajo mediante triangulación desde los puntos A y B, en la entrada de la cueva, siguiendo la planimetría terrestre facilitada por el Dr. Daura (Daura *et al.*, 2017), hasta la piqueta de referencia (Boya 9) en el vértice NE de la cuadrícula (Fig. 58).

Posteriormente, se intentó maximizar el tiempo buscando las áreas de la cuadrícula que fueran más fáciles de sondear, encontrando en (B /-3) y (A /-4) las áreas de trabajo más adecuadas para la extracción de sedimentos ya que, en esta parte de la cuadrícula, había una falta de guijarros grandes y material rocoso voluminoso.

Mediante trabajos manuales y herramientas básicas, se pudo extraer aproximadamente parte de la potencia sedimentada, compuesta principalmente por rocas y guijarros de diferentes granulometrías, la cual se depositaba en un cesto y se colocaba fuera del área de trabajo para evitar su retorno debido a la corriente (Fig. 59.4). A medida que el pequeño sondeo avanzaba en profundidad el material se iba compactado mucho más, lo que complicaba la tarea de extracción. Esto implicaba la necesidad de golpear la base de los guijarros para levantarlos y separarlos del sedimento compactado y así poder continuar los trabajos de sondeo estratigráfico con mayor facilidad, llegando a una profundidad máxima de 35 centímetros.

---

<sup>41</sup> <https://www.windguru.cz/>



Escala 1: 4.500

**Figura 58.** Topografía terrestre de la cova del Gegant donde se aprecia la cuadrícula verde que indica el área de trabajo submarina. Fuente; Adaptación (J. Daura *et al.*, 2010).

El esfuerzo del trabajo de los miembros del equipo en la zona de intervención, debido al oleaje, provocaron que el consumo de aire aumentara progresivamente a pesar de estar a solo un metro y medio de profundidad. Esto creó la necesidad de realizar las tareas de documentación gráfica mientras se continuaba con la extracción de sedimento manualmente.

### **7.2.2. Sondeo arqueológico prospectivo mediante extracción de sondeos estratigráficos**

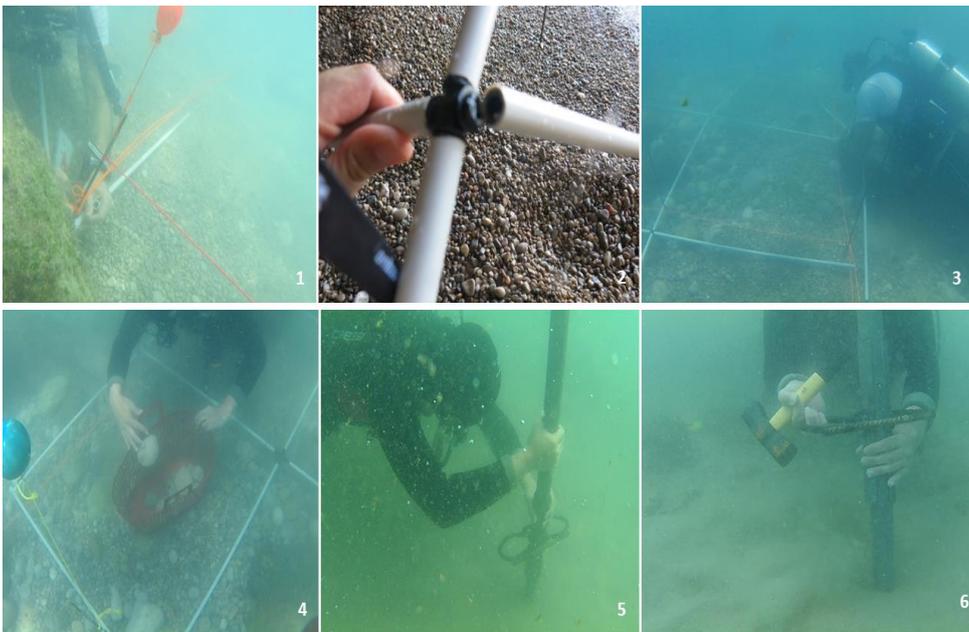
La información estratigráfica representa una de las fuentes base sobre la que se genera parte del conocimiento arqueológico, es por esta razón que la metodología de registro y documentación ha evolucionado hacia la práctica en el manejo de la información estratigráfica (Vera, 1994).

#### *7.2.2.1. Registro estratigráfico obtenido*

La dificultad del proceso de extracción de material en los diferentes cuadrantes de la cuadrícula sumergida modificó el plan establecido, comenzando la segunda parte de los trabajos prospectivos previstos. Estos consistieron en la introducción de un tubo rígido de hierro de 2 metros de largo y de 4.5 centímetros de diámetro diseñado para realizar la extracción del sedimento. La intención era conocer la columna estratigráfica del sedimento ubicado bajo el fondo arenoso, más alejado de la cueva, concretamente donde finalizaba la playa de grandes guijarros y grava. De los cinco intentos en la realización de extracción de los sondeos estratigráficos, sólo dos se hicieron a diferentes profundidades. En esta ocasión se utilizó, desde el punto B georreferenciado en la planimetría del Dr. Daura (Daura *et al.*, 2017), la medición por eje cartesiano, donde se siguió el rumbo a 150°, a 16 metros de la boca de la entrada y a 2.10 metros de profundidad (core núm.1.R1), comprobando que después de clavar el tubo metálico 30 centímetros en la arena encontramos inmediatamente el fondo rocoso. Posteriormente, nos desplazamos cuatro metros más, siguiendo de nuevo con el rumbo a 150°, hasta

llegar a 20 metros de la entrada de la cueva y a 2.60 metros de profundidad. Esta vez se introdujo el tubo de hierro tan solo 15 centímetros en el manto de arena (core núm.2.R2) encontrando enseguida el estrato inferior rocoso. Se hicieron tres intentos más en paralelo a este último, pero se obtuvieron los mismos resultados (Fig. 60).

Finalmente, con un total de cinco intentos de introducción del tubo férreo, por percusión directa en diferentes ubicaciones, los resultados fueron todos negativos. Esto se debe a que la potencia del estrato superior arenoso era muy débil, lo que provocó que el tubo alcanzara muy rápidamente el estrato inferior rocoso y compacto, imposible de penetrar más de 30 centímetros, haciendo inviable el sondeo por este método (Gratacós, 2004) (Fig. 59.5 y 59.6).

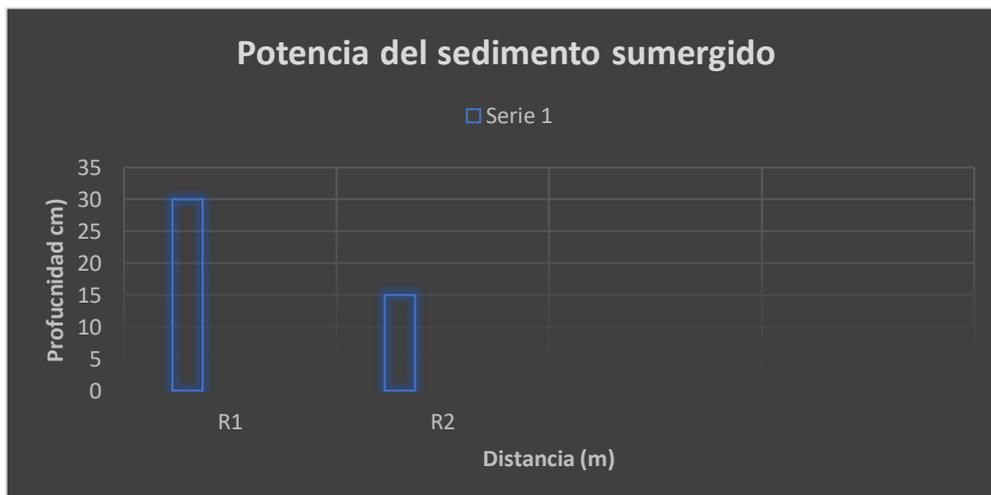


**Figura 59.** Imágenes de los trabajos de prospección llevados a cabo en la cova del Gegant; **1.** Imagen de la piqueta núm. 9 triangulada desde la entrada de la cueva. (Foto. Autor). **2.** Junta de la cuadrícula rota por las olas. (Foto. Autor) **3.** Colocación de la cuadrícula submarina. (Foto. Autor). **4.** Extracción manual de guijarros con una cesta. (Foto. Autor). **5.** Introducción del tubo en el estrato arenoso al tratar de realizar un sondeo estratigráfico (Foto. Autor). **6.** Detalle de la plataforma de percusión del tubo metálico. (Foto. Autor).



**Figura 60.** Medición por eje cartesiano desde el punto B con la ubicación de los intentos negativos de extracción de sondeos estratigráficos. Fuente; elaboración propia.

Metodológicamente, como fase inicial los sondeos realizados nos ayudaron a entender qué área de estudio nos resultaba más favorable a la hora de maximizar nuestro tiempo bajo el agua. La presencia de un sedimento compactado o rocoso bajo la débil capa arenosa demostró que la situación era idónea si queríamos hacer un estudio completo del estrato rocoso (Gráficos 3 y 4).



**Gráfico 3.** Lectura vertical de la potencia del sedimento sumergido mediante la extracción de dos cores estratigráficos (R1 a 16 metros y R2 a 20 metros) con acimut de 150°. Fuente; elaboración propia.

Lamentablemente, el hecho de que solo pudiéramos conocer 30 centímetros de estratigrafía abre muchas incertidumbres sobre cuál es la mejor área de trabajo para futuras intervenciones arqueológicas.

En definitiva, el resultado final nos mostró que, a medida que aumentaba la columna de agua sobre la ubicación donde se realizaba el sondeo, la capa de sedimento arenoso disminuía en potencia. La dinámica sedimentaria debe buscarse en la intensidad del oleaje que provocaba que la capa de estrato arenoso con granulometría más delgada fuera más potente a medida que disminuía la columna de agua cuando en principio debería ser al revés, ya que lo habitual es que la capa de sedimento arenoso aumente con la profundidad debido a la falta de oleaje.



**Gráfico 4.** Lectura de la profundidad del suelo marino y profundidad de la columna de agua de la ubicación donde se realizó la extracción de los cores estratigráficos (R1 y R2). Fuente; elaboración propia.

La realización de sondeos arqueológicos y su representación gráfica manual en diferentes soportes y formatos se convierte en una herramienta esencial de registro para futuros estudios. El registro y archivo de los datos del trabajo de campo nos servirá para futuras intervenciones ya que podrá ser consultada y comparada con los diferentes niveles estratigráficos, observando de este modo su evolución (Aguilar, Granado y Barrera, 2015).

### 7.3. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA COVA DE LA FALCONERA

Los trabajos arqueológicos prospectivos realizados en la cavidad submarina de la Falconera (Garraf) se solaparon en el tiempo con los llevados a cabo por los geólogos del Área Metropolitana de Barcelona (AMB), quienes estaban estudiando la contaminación del acuífero interno y la calidad del agua del sistema hidrogeológico (Freixes *et al.*, 2021). En ambos casos se tuvieron que cumplir unas premisas previas para su buena organización y logística. Estos factores extrínsecos fueron: una térmica favorable, un oleaje mínimo, un momento de estiaje en la surgencia interior de agua dulce y un nivel de contaminación y percolación de la cueva óptimo para permitir una visibilidad mínima aceptable (Fig. 61.1 y 61.2). En nuestro caso, elegido el sector o segmento de la cavidad de interés, quedaba tan solo responder a las preguntas ¿cómo prospectar? y ¿cómo registrar adecuadamente la ubicación de esa prospección? Para esto, se debía conocer la estrategia de trabajo que comprendiera el conocimiento del área de intervención y la organización en la distribución de éste, sabiendo que la técnica más eficaz siempre es el muestreo sistemático (Renfrew y Bahn, 2004).

La obtención de una geolocalización rigurosa dentro de una posible área concreta de intervención y sondeo se consigue, habitualmente, a través del cálculo de la poligonal y suele realizarse con un mínimo de tres espeleo-buceadores (Huber, 2009, 2014). Desafortunadamente, la pésima visibilidad habitual en la Falconera no permitía realizar esta técnica con las garantías de seguridad necesarias, haciendo necesario descartarla.

#### 7.3.1. Resultados topográficos

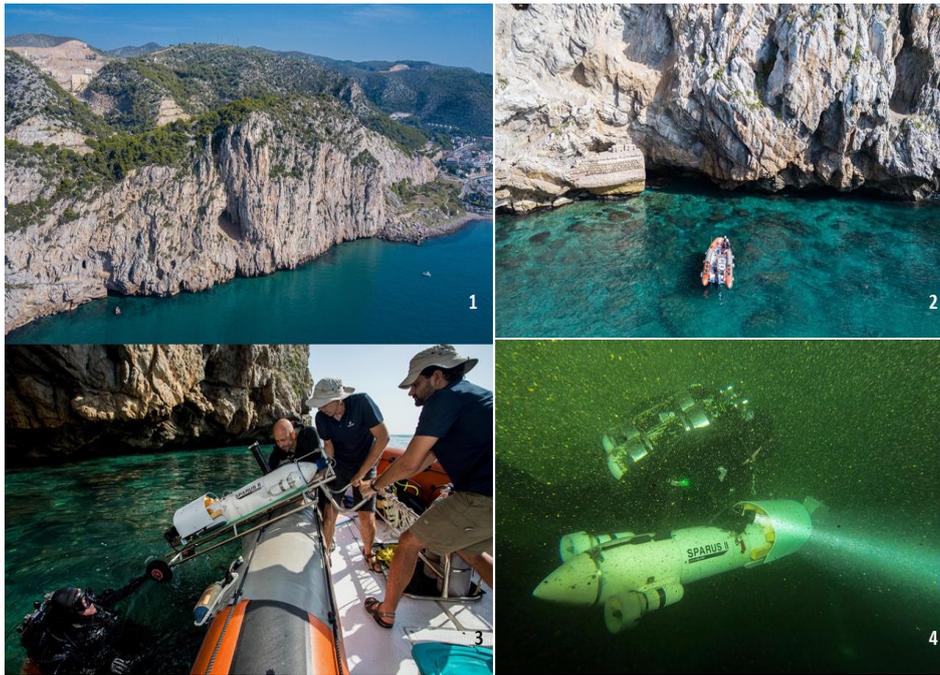
##### 7.3.1.1. Método prospectivo de mapeo volumétrico con ecosonda multihaz. AUV SPARUS II

El uso de los vehículos autónomos subacuáticos (AUV) es una técnica poco usual en el estudio de cavidades sumergidas, debido a la complejidad de su uso dentro de estos ambientes confinados.

El AUV del CIRS denominado SPARUS II estaba equipado con una sonda Imagenex Delta T Multihaz, montada en la unidad de giro e inclinación, en la parte frontal del aparato, la cual era capaz de crear una nube de puntos 3D del recorrido a documentar (Figs. 61.2 y 61.3). Esto se consigue combinando este perfil multihaz, de una apertura de 120°, con la trayectoria estimada del robot, que se calcula con sus sensores de navegación. De este modo, el módulo de mapeo del SPARUS II crea una representación del entorno, mediante el uso de datos recibidos de forma mecánica por el sonar, proporcionando un rango de información sobre los obstáculos cercanos que, combinados con la navegación del vehículo (posición y orientación), permite el mapeo 3D del espacio tridimensional solicitado, con respecto a una coordenada inercial marco (Carreras *et al.*, 2018) (Fig. 61.4).

En nuestro caso, no era posible la introducción del AUV en la cavidad de la Falconera, de forma autónoma, debido a las características de confinamiento y visibilidad específicas de la cavidad. Conocedores de que, si los resultados de las pruebas eran positivos, se dispondría tanto de un modelo tridimensional del primer tramo como de un mapa de cualquier evidencia antrópica de la Galería Jaime Ferrán e, incluso, de la surgencia de agua dulce procedente del macizo del Garraf. El único problema se planteaba en la metodología por utilizar al introducir el AUV dentro de la cavidad sumergida, puesto que, el dispositivo no era capaz de entrar y salir de modo autónomo, lo que invalidaba el modelo de trabajo. Tras varias deliberaciones con el equipo de espeleo-buceadores, se decidió que éstos guiarían el aparato durante la inmersión, llevándolo de forma manual, en flotabilidad neutra, por todo el recorrido de la galería hasta llegar a la primera restricción (Fig. 61.4).

Además, para lograr resultados óptimos, se necesitaba la obtención de una nube de puntos tridimensional que creara un modelo 3D, para esto, el SPARUS II debía dar una vuelta completa de 360° cada varios metros de avance.



**Figura 61.** Imágenes del Proyecto Falconera; **1.** Vista general del macizo del Garraf y entrada a la cova de la Falconera. (Foto; Florian Huber). **2.** Entrada por mar a la cavidad de la Falconera. (Foto; Florian Huber). **3.** Equipo del CIRS ubicando el SPARUS II en el agua. (Foto; Florian Huber). **4.** Espeleo-buceador guiando al SPARUS II dentro de la cavidad. (Foto; Florian Huber).

Tras un primer reconocimiento de la cavidad, se dio vía libre a la introducción del vehículo submarino autónomo (AUV) y se programó que la sonda multihaz del AUV SPARUS II, a cada barrido, cambiara su rango a 5, 10 y 20 metros. Para ello era necesario hacer girar de forma manual el lector colocado en la parte posterior del AUV 360° cada 5 metros y así, conseguir que el sonar pudiera realizar la volumetría entera de la Galería Jaume Ferrán. La finalidad última era obtener un mapa completo de la galería con cada uno de los rangos y comprobar cuál era el más idóneo, puesto que este tipo de sensor no se había probado en el interior de una cueva (Vallicrosa *et al.*, 2020).

Los resultados previos, a falta de un posterior procesamiento de los datos, tuvieron una valoración positiva por parte de los ingenieros del Centro de Investigaciones en Robótica Submarina (CIRS) lo que demostraba ya en un primer momento que la metodología de inmersión era la adecuada y que los sensores del SPARUS II habían funcionado de forma correcta. En el laboratorio, los ingenieros del CIRS procesaron los datos al utilizar la reconstrucción en Dear-

Reckoning (DR)<sup>42</sup>, en la que los puntos del multihaz se complementaron con la navegación del vehículo. Una vez obtenida esta representación, la trayectoria se dividió en diferentes partes que, tras un solapamiento de datos, se volvieron a unir tras aplicar una minimización de Iterative Closest Point (ICP)<sup>43</sup> para corregir el error de DR (Vallicrosa *et al.*, 2020).

Una vez finalizado el primer procesamiento de datos, en el modelo de nube de puntos, los diferentes colores indicaron las distintas profundidades, siendo las zonas de color rojo las zonas menos profundas y las de color azul las más profundas. Este primer procesamiento de datos ayudó a comprender que la obtención de datos por parte del SPARUS II funcionó de forma correcta y que los puntos lograron la superposición a diferentes distancias al crear una malla tridimensional de la galería. La visualización del modelo escalado nos permitió observar un segmento de paredes cársticas lisas a modo de tubo circular de aproximadamente 32 metros de largo, 4.5 metros de ancho y 7 metros de alto, con una cota máxima de profundidad de -17 metros y una orientación SE-NW. Esta sección presentaba leves protuberancias rocosas en el techo, sin espeleotemas, sin abrigos rocosos ni bifurcaciones adicionales ni galerías secundarias y con un suelo cubierto por un manto de sedimento arenoso, por lo cual el caudal de entrada de agua salada y salida del agua dulce no se veía afectado por obstáculo alguno (Fig. 62.1).

Es probable que, y vista la rapidez en la ejecución de las tareas con el AUV, si la restricción hubiera dado la posibilidad de ser atravesada llegando hasta la gran Sala de Ballester-Admetlla, el equipo habría sido capaz de extraer mucha más información, pero la línea guía que atraviesa la restricción del Pas d'en Carles estaba enterrada por toneladas de arena, por lo que esta tarea resultó completamente inviable (Fig. 40).

---

<sup>42</sup> Dear-Reckoning o la navegación a estima es el proceso de calcular la posición actual de algún objeto en movimiento mediante el uso de una posición previamente determinada, o fijo, y luego incorporando estimaciones de velocidad, dirección de rumbo y curso durante el tiempo transcurrido.

<sup>43</sup> El punto iterativo más cercano es un algoritmo empleado para minimizar la diferencia entre dos nubes de puntos. ICP se usa a menudo para reconstruir superficies 2D o 3D a partir de diferentes escaneos, para localizar robots y lograr una planificación de ruta óptima, para registrar conjuntamente modelos óseos, etc.

### 7.3.1.2. Método prospectivo de mapeo por hilo. MNEMO

Desde un punto de vista objetivo, toda prospección arqueológica topográfica subacuática necesita de varios requisitos para que muestre fiabilidad y rigurosidad a partes iguales. Los métodos indirectos planimétricos deben ir siempre ligados a una geolocalización exacta, cosa que no es fácil de conseguir en ambientes confinados sumergidos. Por este motivo, los trabajos de sondeo multihaz 3D del AUV debían ir georreferenciados por una coordenada de inicio y final que mostrara, sobre el mapa geográfico y sobre la topografía subacuática manual, que área de terreno había sido prospectada y qué coordenadas exactas tenían los posibles puntos de interés. Además, esa coordenada interior serviría como referencia inicial o punto 0, ante una nueva prospección arqueológica, puesto que está la capacidad de transportar a SIG la geolocalización exacta de la dispersión de los materiales arqueológicos encontrados (Fumás, 2022a).

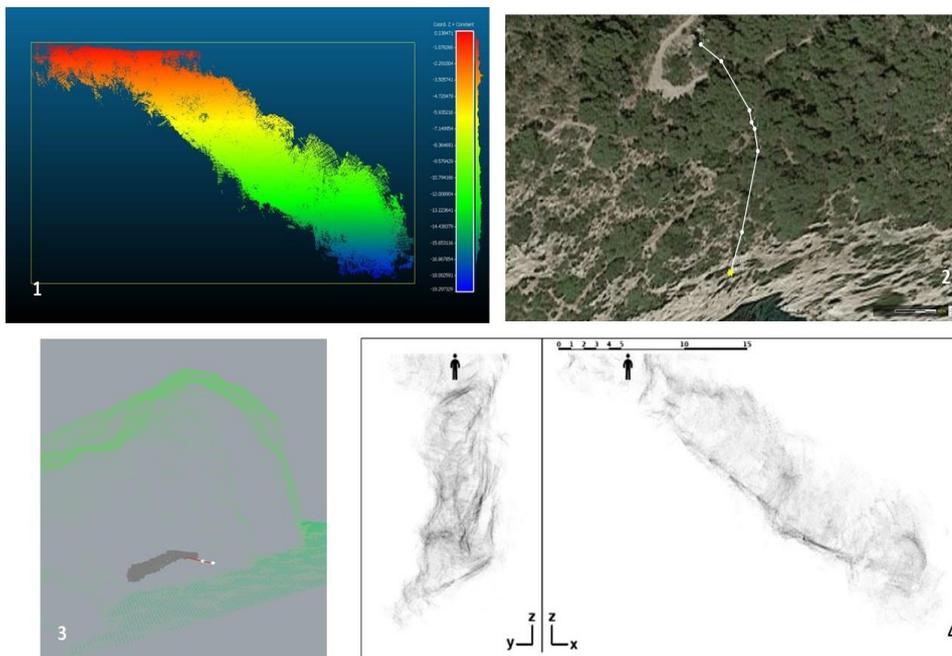
Para solucionar la problemática de georreferenciación, se utilizó el mapeo por hilo mediante el uso del dispositivo MNEMO, desde la sala denominada Estany Blau o Sala de Entrada, hasta la primera restricción a la Sala Ballester-Admetlla (Fig. 62.2). Para ello fue necesario lanzar una línea secundaria que uniera el muro de contención de la entrada desde el mar, como coordenada tomada en el exterior, hasta el final de la Sala del Estany Blau, justo en el punto en el que comienza la línea fija o hilo guía anclada a la pared de la cavidad, en la Galería Jaume Ferran, y que se dirige hacia la restricción.

El mapeo por hilo se realizó con el MNEMO, el cual, como se ha comentado con anterioridad, es un dispositivo comercial de prospección por línea, inventado por el ingeniero francés Sebastien Kister<sup>44</sup> capaz de realizar un mapeo de la cueva a través del seguimiento del hilo que sirve a los espeleo-buceadores para guiarse dentro de la cavidad (Kister, 2017). De este modo, las tareas de sondeo multihaz del AUV SPARUS II se completaron con otras de prospección de mapeo por hilo, al utilizar el dispositivo MNEMO (Kister, 2017), desde la boca de la cueva hasta la primera restricción en la Galería Jaume Ferran (Figs. 62.3 y 62.4). En primer

---

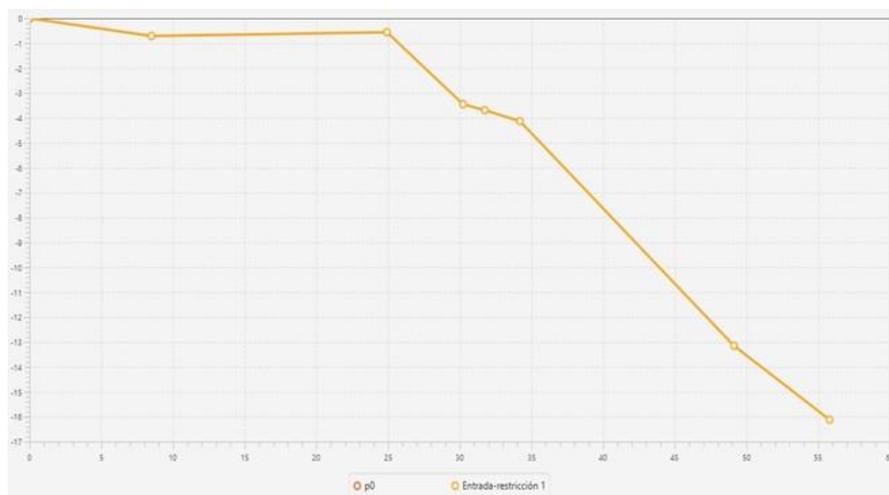
<sup>44</sup> <https://www.arianesline.com/>

lugar, se lanzó una línea secundaria desde la entrada aérea hasta la línea guía, la cual comienza cuando la pendiente es más pronunciada en la galería. Posteriormente, se continuó con la medición de línea hasta la primera restricción, en el denominado Pas d'en Carles, localización exacta donde acaban también los trabajos del AUV (Fumás, 2022a). La escasa longitud de la línea de mapeo, con tan solo 7 *tracks* o disparos, fue suficiente para conocer la orientación de la cavidad, la profundidad de cada uno de los segmentos mapeados y la distancia recorrida entre cada una de éstas (Gráfico 2). Además, al analizar la desviación del acimut en cada uno de los *tracks* indicados por el software ARIANE, se pudo comprobar que el margen de error entre la lectura realizada por el dispositivo MNEMO y la topografía manual no era aceptable. Por el contrario, las mediciones obtenidas por el dispositivo de mapeo por hilo fueron similares a las del SPARUS II, respecto al acimut, distancias y profundidad, lo cual validó este modo de lectura y corroboró la rigurosidad en las mediciones tomadas (Gráfico 3).



**Figura 62.** Datos obtenidos mediante el uso del SPARUS y el MNEMO; **1.** Primera toma de datos del SPARUS II con registro de profundidad en diferentes colores. Fuente; (Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a). **2.** Línea del mapeo por hilo realizada por el dispositivo MNEMO realizado por el software ARIANE sobre ortofotomapa. Fuente; (Fumás, 2022a). **3.** Solapamiento de la nube de puntos obtenida por el SPARUS II y la línea del MNEMO en perfil del área prospectada. Fuente; (Fumás, 2022a). **4.** Mapa escalado de los de puntos obtenidos en X, Y y Z de la Galería Jaume Ferran. Fuente; (Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a).

La divergencia de datos apareció al superponer en el software ARIANE la topografía realizada por el ECMB con las medidas tomadas con el mapeo por hilo del MNEMO, puesto que éstas no eran coincidentes. En el software, las distancias del dispositivo parecían correctas, aunque había un porcentaje mínimo de error sobre la topografía manual de 5° en el acimut en el segmento 3 y 6 mientras que el resto de los segmentos no presentaban ningún error de desviación. Este problema en la superposición podría ser causado por la falta de una estación total o GPS diferencial, al tomar la coordenada exacta del punto de partida del hilo, situado en la boca de la cova de la Falconera, o por un error en la topografía manual (Fumás, 2022a) (Gráfico 5).



**Gráfico 5.** Perfil de las mediciones de distancia y profundidad tomadas por el MNEMO desde el Punto 0, tomado en la entrada a la cavidad, hasta la primera restricción denominada Pas d'en Carles. Fuente; (Fumás, 2022a).

### 7.3.1.3. La topografía terrestre para la obtención de coordenadas

El logro de una coordenada de inicio precisa en la entrada de la cavidad era uno de los problemas más importantes de todo el proyecto, debido a la imposibilidad de utilizar una estación total en esa ubicación y por la obtención de lecturas erróneas con los GPS convencionales, al estar la boca de la cueva en la parte cóncava de la roca, al pie del acantilado. Las coordenadas publicadas hasta la

fecha habían sido tomadas desde una embarcación próxima a la entrada sumergida con un puntero laser y extrapolando la medición hasta la ubicación deseada.

Debido a las condiciones de confinamiento de los entornos a levantar, el único modo de georreferenciar la poligonal, es decir, obtener sus coordenadas referidas a un sistema de referencia global, era mediante el enlace de ésta con puntos exteriores de los cuales se conocieran sus coordenadas georreferenciadas, obtenidas en superficie terrestre, fuera del entorno confinado (Fig. 63.1). En este tipo de metodología topográfica se suelen elegir una serie de puntos fijos que rodeen la entrada a la cueva, al ser materializados sobre el terreno mediante el empotramiento de clavos de acero para, al final, realizar sobre ellos observaciones GPS y obtener así sus coordenadas georreferenciadas mediante un levantamiento RTK<sup>45</sup> con posicionamiento en tiempo real y diferencial GNSS<sup>46</sup>, conectado con una Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes (ERGNSS), mediante una solución VRS (Estaciones de Referencia Virtual)<sup>47</sup>(Leica-Geosystems, 2020b).

Desde éstos y por topografía clásica, al utilizar una estación total, se puede obtener las visuales (distancia geométrica, ángulo horizontal, ángulo vertical, altura de aparato y altura de mira) que permiten, mediante una intersección inversa, obtener las coordenadas georreferenciadas (X, Y, Z) del primer punto de esa poligonal ubicado, en este caso, sobre un muro artificial realizado en la entrada de la cavidad sumergida (Fig. 63.2 y 63.3). Con lo anterior, se asegura que los errores de las coordenadas georreferenciadas del primer punto de la poligonal se pueden considerar despreciables, puesto que los errores introducidos por las observaciones, ya en el espacio confinado, serán mucho mayores (Fumás, 2022a).

En este caso se utilizó la topografía de precisión, mediante la realización de una poligonal que unía en superficie dos puntos externos cercanos a la entrada a la

---

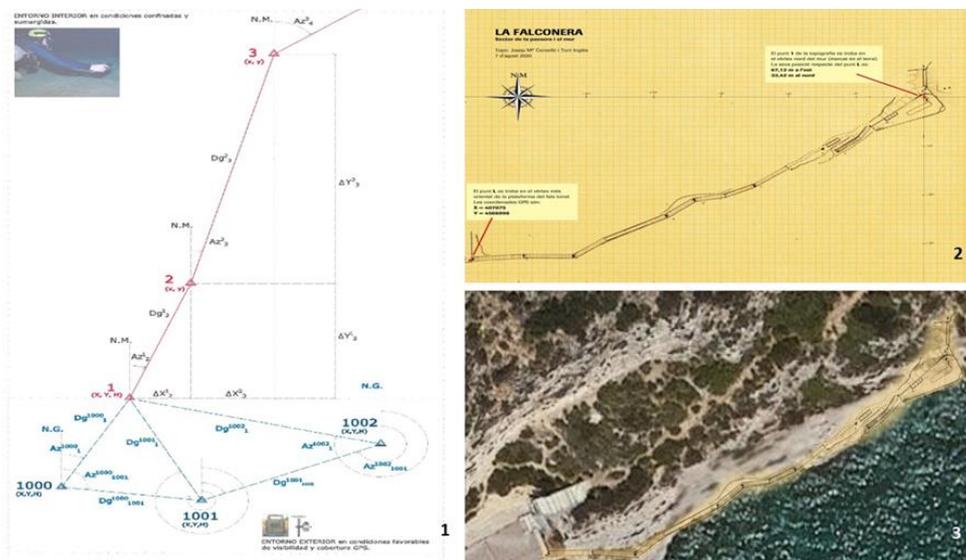
<sup>45</sup> Los levantamientos RTK son similares a los cinemáticos (método de captura que no tiene limitantes de visual a la base, ni recepción de correcciones en tiempo real, pues basta con tener una base observando en modo estático) pero resuelve las coordenadas de los puntos medidos en tiempo real. Se suele utilizar para levantamientos topográficos con GPS de alta precisión en áreas pequeñas.

<sup>46</sup> GNSS es una familia completa de dispositivos que, a diferencia del GPS, puede medir la distancia de los satélites utilizando una variedad de frecuencias diferentes.

<sup>47</sup> El concepto de VRS (Virtual References Station) está basado en una red de estaciones de referencia GPS continuamente conectadas mediante líneas de teléfono, DSL/Cable, etc.

cueva. El primero de los puntos con el que se obtuvo la coordenada fue en el Pozo de l'Eusebi, UTM 31N, X: 407131.2890, Y: 4567099.2220, y el segundo punto, denominado Punto L, vértice más oriental de la plataforma del falso túnel, en el que se obtuvo la coordenada verificada UTM 31N, X: 407075, Y: 4566998. Esta última coordenada se encuentra con respecto al Punto 1, que marca el punto de referencia de entrada a la cova de la Falconera, en el vértice de la plataforma superior del muro realizado por Eusebio Güell en 1890 y el cual está a 67.12 metros al Oeste y a 33.42 metros al Norte (Fig. 63.2 y 63.3).

Gracias a la obtención de las coordenadas georreferenciadas de ambos puntos de la poligonal se pudieron georreferenciar todos y cada uno de los otros vértices y conseguir un solapamiento del plano sobre ortofotomapa. De este modo, se pudo obtener la coordenada de referencia de entrada al espacio confinado, Punto 1, en una cartografía global, concretamente en las coordenadas UTM 31N, X: 407153.1350, Y: 4567019.6980. Este método en la obtención de coordenadas GPS con topografía clásica, ahora exterior, es una de las soluciones más eficaces y eficientes.



**Figura 63.** Estudios topográficos en la cova de la Falconera; **1.** Esquema ejemplo del estudio de las poligonales terrestres para la obtención del punto 1 de entrada a la Falconera. (Autor; Pablo Cantuel). **2.** Hoja milimétrica y escalada del perfil de la costa del Garraf y cálculo de las distancias de la poligonal para la obtención de la coordenada punto 1. (Autores; Josep María Cervelló y Toni Inglés). **3.** Solapamiento del dibujo escalado de la costa del Garraf con los puntos obtenidos sobre ortofotomapa. (Autores; Josep María Cervelló y Toni Inglés). Fuente; (Fumás, 2022a).

### 7.3.2. Métodos prospectivos manuales complementarios

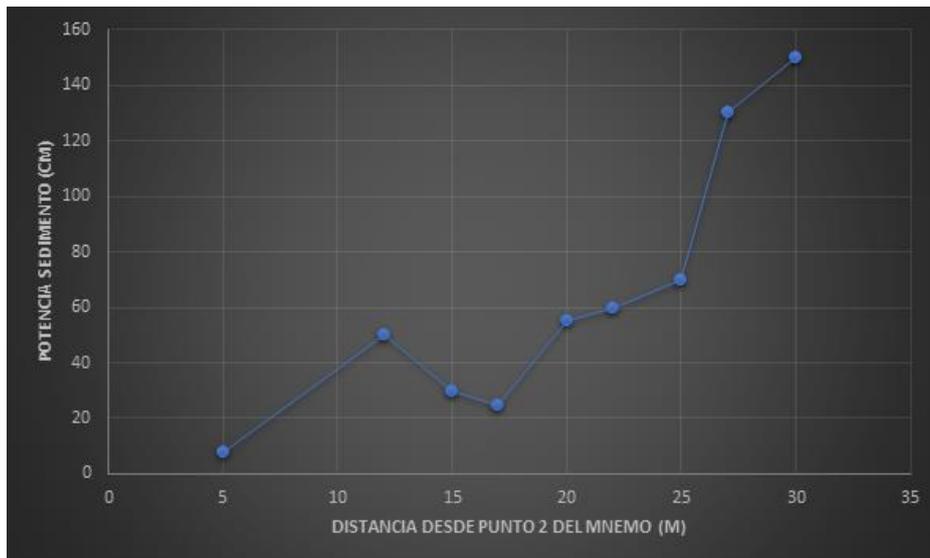
Tras un análisis previo de la topografía de precisión registrada por el AUV, y siendo conocedores de la inexistencia de una zona de resguardo, debido a la homogeneidad de la Galería Jaume Ferran (Fig. 64.1), tan solo quedaba complementar la prospección buscando el área con menos potencia de sedimento para la extracción de cores estratigráficos (Fig. 64.2).

Conocedores de que el modelo de trabajo para localizar y estudiar asentamientos sumergidos prehistóricos se basa en identificar, ubicar y caracterizar sitios a través de la recolección de testigos o cores estratigráficos procedentes de paleosuelos no alterados de las áreas expuestas debajo de unos pocos metros de arena (Aguilar, Granado y Barrera, 2015). Al igual que en los estudios realizados en la cova del Gegant, el criterio metodológico se basó en el conocimiento establecido de que, cuando se producen asentamientos humanos, los sedimentos se enriquecen con firmas mineralógicas específicas como los minerales arcillosos calentados o por conjuntos de micro permanentes antropogénicos como podrían ser los fitolitos, pseudomorfo de ceniza y esferolitos de estiércol. Es por esto que, en este caso también la micro morfología puede ayudar a identificar patrones micro estratigráficos típicos de los asentamientos humanos (Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021).

De este modo, y a modo de contextualización, se tomaron diferentes mediciones de la potencia sedimentológica tanto en la Sala de Entrada, o Sala de l'Estany Blau, pasando por la Galería Jaume Ferrán, hasta llegar al Pas d'en Carles o primera restricción (Fig. 64.2). Para esto, se tomó como referencia el punto 2 del MNEMO con coordenadas UTM 31N, X: 407160.1, Y: 4567043.5, señalado mediante un hilo auxiliar a la roca (Fig. 64.1). Desde ese punto se lanzó una línea métrica, en paralelo al hilo guía, por la pendiente y se tomó el registro de la potencia sedimentológica arenosa mediante una varilla metálica marcada cada 10 centímetros. Esta varilla se fue introduciendo de manera aleatoria mientras se tomaba registro de profundidad y distancia desde el Punto 2 (Fig. 64.2).

En principio, estas mediciones de la potencia sedimentaria de la arena depositada en la pendiente de la Galería de Jaume Ferrán aumentaban a medida que la

profundidad era mayor, pero, al llegar a los 17 metros del punto 2 del MNEMO<sup>48</sup> y a 7.8 metros de profundidad, se encontró una ubicación con potencia débil de tan solo 20 centímetros. Este punto sería un indicador a favor, para realizar el sondeo estratigráfico del relleno subyacente a las arenas y que correspondería con las coordenadas UTM 31N, X: 407154.2, Y: 4567057.2 (Gráfico 6).

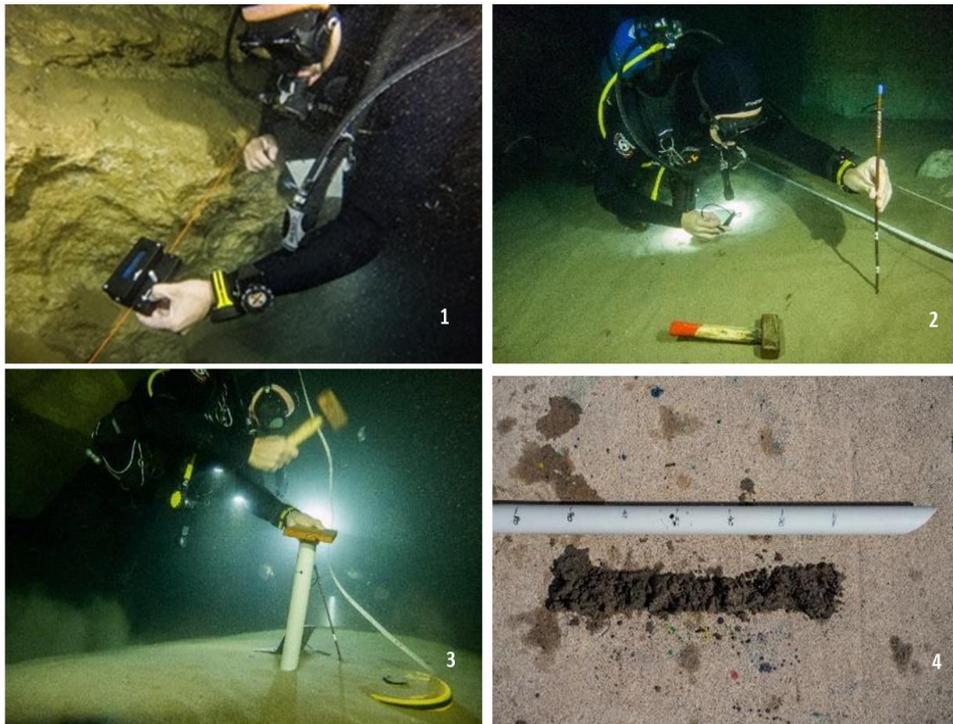


**Gráfico 6.** Potencia o grosor del sedimento en centímetros en el interior de la Galería Jaume Ferran desde el punto 2 del MNEMO. Fuente; (Fumás, 2022a).

Finalmente, se recogió una pequeña muestra de sedimento con un tubo de PVC de 6 centímetros de diámetro y 1 metro de largo en el punto 3 del MNEMO, al comienzo de la Galería Jaume Ferrán en las coordenadas UTM 31N, X: 407414.7, Y: 4587031.2 (Gráfico 4). Allí, la potencia del sedimento era de unos 40 centímetros. Esta muestra no fue fácil de obtener debido a la compactación del sustrato arenoso, por lo que fue necesario utilizar la percusión directa con un martillo para introducir el tubo de PVC en el manto de arena compactada (Fig. 64.3).

<sup>48</sup> El software ARIANE, en el cual se descargan los datos obtenidos por el MNEMO nos da por defecto unas coordenadas geográficas. En nuestro caso, y para unificar criterios metodológicos en la tesis convertiremos todas las coordenadas a universal transversal de Mercator (UTM) mediante el conversor en línea; <https://franzpc.com/apps/conversor-coordenadas-geograficas-utm.html>

Al extraer el sedimento del interior del muestreo o core estratigráfico, se pudo comprobar la homogeneidad sedimentaria en esta parte de la cueva, lo que indicó que, para acceder al estrato inferior en busca de un posible relleno sedimentario anterior a la duna arenosa se debían utilizar herramientas específicas que permitieran superar esta primera acumulación arenosa, completamente estéril desde el punto de vista arqueológico (Fig. 64.4) (Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021).

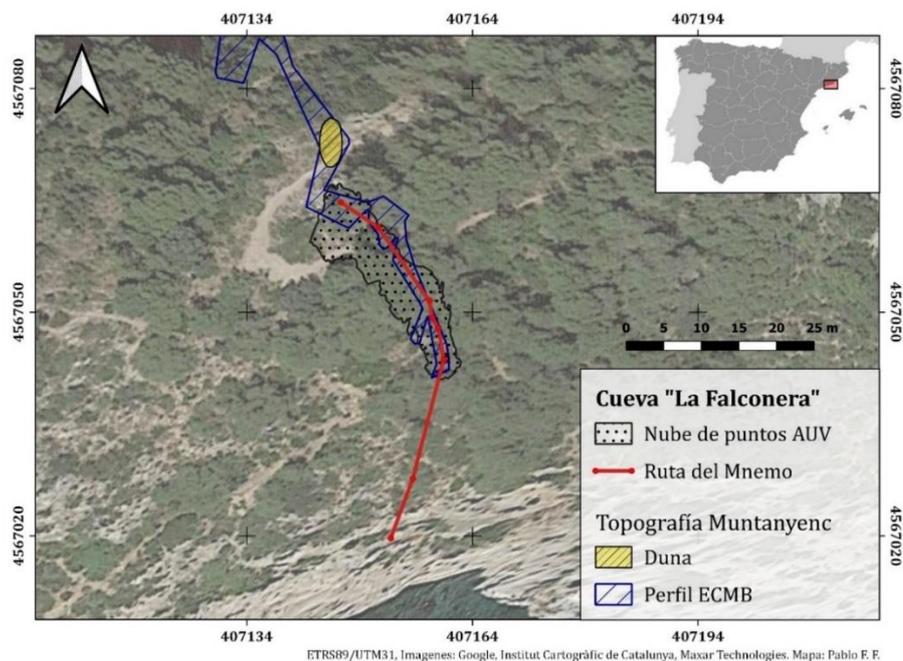


**Figura 64.** Trabajos de prospección subacuática en la cova de la Falconera; **1.** Espeleo buceador utilizando el dispositivo MNEMO en el interior de la cova de la Falconera. (Foto; Florian Huber). **2.** Espeleo buceador midiendo con una varilla metálica el grosor del sedimento arenoso depositado en la Galería Jaime Ferran. (Foto; Florian Huber) **3.** Espeleo buceador realizando un core estratigráfico mediante la introducción por percusión de un tubo de PVC en el sustrato de sedimento arenoso. (Foto; Florian Huber) **4.** Muestra de la homogeneidad del core estratigráfico con la aparición del sustrato arenoso en el interior del tubo de PVC. (Foto; Florian Huber). Fuente; (Fumás, 2022a).

### 7.3.3. Análisis de los resultados mediante técnicas SIG

Tras la visualización en SIG del procesamiento de los datos registrados por el AUV SPARUS II, se observó que el modelo de planta coincidía plenamente con la orientación y distancias de la Galería Jaime Ferrán, al ser corroboradas las mediciones obtenidas por el dispositivo de mapeo por hilo MNEMO (Fig. 64.1). Así, gracias a la toma de mediciones correctas, al geoposicionamiento del Punto 0 de la línea guía, al modelo tridimensional final del SPARUS II y a la georreferenciación de las diferentes coordenadas dentro de la cueva, se pudo realizar las mediciones desde el propio modelo 3D escalado y geo-posicionado.

Los resultados obtenidos, tras la visualización de los datos en el SIG, constataron las discrepancias importantes en la topografía del ECMB, desde la entrada a la cavidad hasta la Galería Jaime Ferrán y en el segmento 6 del MNEMO, con una variación hacia el Este de la topografía manual debido a un posible error en el cálculo del acimut (Fig. 65).



**Figura 65.** Mapa escalado con solapamiento sobre ortofotomapa de la topografía del ECMB, la línea de MNEMO y la nube de puntos obtenida por el SPARUS II (Autor; Pablo Fraile). Fuente; (Fumás, 2022a).

#### 7.3.4. Resultados finales en la obtención de los puntos de control y referencia

En resumen, y tras toda la recopilación de datos, nos encontramos ante una cavidad con una galería sumergida homogénea y de paredes regulares, lo cual imposibilitó seguir con las indicaciones de los estudios sugeridos por Flemming respecto a la búsqueda de una zona resguardada que ampliara las posibilidades de encontrar restos arqueológicos (Flemming *et al.*, 2014).

Las mediciones coincidentes de los dispositivos electrónicos nos indicaron unas nuevas medidas de la cueva que nos permitieron generar coordenadas univocas, lo cual nos autorizó a generar un nuevo plano topográfico viable de interpretación y consulta.

Por otro lado, metodológicamente, pudimos corroborar que el primer punto de control se obtuvo a través del cálculo de las poligonales de la coordenada terrestre gracias a la topografía exterior, con un rango de error mucho menor que la topografía interior, ya que los dispositivos utilizados eran de mayor precisión y exactitud en la consecución del denominado punto 1. Ese punto era coincidente con el punto 0 del dispositivo de mapeo por hilo MNEMO como punto de partida (Gráfico 2). Llegado al punto 3 del MNEMO, comenzó la referencia como punto de partida del estudio volumétrico 3D del SPARUS II en la Galería Jaume Ferrán hasta la primera restricción (Fig. 63.1). Y a partir de la referencia del punto 2 del MNEMO, se realizaron las mediciones de potencia sedimentológica hasta llegar a los 17 metros de distancia de ese punto de control, por el centro de la pendiente y a 7.8 metros de profundidad, ubicación coyuntural, con la potencia de sedimento más débil, de tan solo 20 centímetros, y favorable para realizar un sondeo estratigráfico del subsuelo, al corresponder concretamente a las coordenadas UTM 31N, X: 407154.2, Y: 4567057.2 (Gráfico 6) (Fumás, 2022).

## 7.4. RESULTADOS DEL PROYECTO IASCM

### 7.4.1. Resultados de los trabajos arqueológicos prospectivos del Proyecto IASCM

Aunque las primeras campañas del Proyecto IASCM presentaron algunas dificultades, tanto logísticas, económicas como humanas, el proyecto fue capaz de generar un estudio de carácter empírico que avanzó en base a la propia experiencia. La realidad más llamativa del proyecto de investigación es la definición de los resultados, puesto que éstos son directamente proporcionales a la inversión económica y humana que se les dedique, es decir, resulta más complejo y difícil generar un método económicamente viable que apostar por la utilización de una metodología que use herramientas electrónicas avanzadas que reduzcan esfuerzo y tiempo al equipo de trabajo.

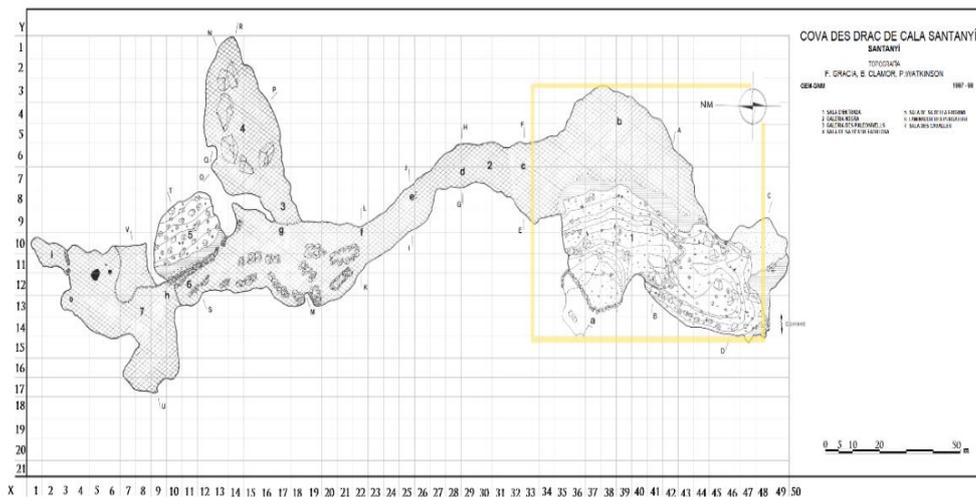
### 7.4.2. Resultados obtenidos en la cova des Drac de Cala Santanyí

Dentro del plan de intervención del proyecto IASCM programado en diferentes campañas de campo, la cova des Drac de Cala Santanyí fue una de las primeras en ser prospectada con la intención de recoger datos para futuras intervenciones más exhaustivas (Fig. 69.1). El área de intervención estuvo centrada en la pendiente de rocas producida por el derrumbe del techo de la cavidad donde se habían encontrado durante años fragmentos cerámicos de diferentes tipologías y cronologías (Figs. 69.3 y 69.4).

#### 7.4.2.1. Resultados topográficos y arqueológicos

Las tareas prospectivas consistieron en localizar, documentar y geo posicionar los restos arqueológicos remanentes entre los bloques de rocas y piedras de la pendiente de derrumbe que se sumerge en el lago de la cueva. En primer lugar, se

consultó la topografía manual realizada previamente (Gràcia *et al.*, 1998) (Fig. 66). En nuestro caso, todas las mediciones realizadas debían quedar reflejadas sobre un plano o sobre una topografía para poder programar las intervenciones, gestionar los trabajos y difundir los resultados. Para ello, se trazó una cuadrícula sobre la topografía manual de la cueva para ordenar y posicionar las piezas encontradas y geolocalizar los sondeos subacuáticos efectuados durante los días de trabajo de campo (Fig. 66 y 69). Así, a medida que se avanzó en la prospección visual pendular se iban documentando sobre el plano topográfico las diferentes piezas, y se completaba el estudio mediante la medición por triangulación, a la vez que se registraba fotográficamente todas y cada una de las piezas encontradas (Green y Gainsford, 2003; Aguilar, Granado y Barrera, 2015)(Fig. 69.3).



**Figura 66.** Topografía de la cavidad con el detalle del área de trabajo prospectivo (cuadro amarillo). Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 1998).

Para conseguir una localización y una geo posición aproximada de la dispersión de los restos arqueológicos sumergidos, mediante el cálculo de poligonales por triangulación, debíamos partir de una coordenada lo más rigurosa posible, lo cual era complejo de conseguir a falta de un dispositivo GPS (Izaguirre, 2010) y un clinómetro, lo cual ya nos garantizaba que nuestra tolerancia topográfica<sup>49</sup> sería

<sup>49</sup> La tolerancia es la cantidad máxima de error que se puede cometer en la realización de un trabajo topográfico. La tolerancia está directamente relacionada con el límite de percepción visual, ya que suelen igualarse. La tolerancia va a ser la que nos plante el trabajo, según la cual se

alta o poco rigurosa (Pereda y Sánchez, 2013; Fumás, 2022b). Por eso, tomamos la topografía manual y la coordenada de referencia del artículo referente a la cova des Drac de Cala Santanyí (Gràcia *et al.*, 1998), UTM 31N, X: 512800, Y: 4353630.15, para posteriormente lanzar, desde esa coordenada aproximada (punto 1), una línea de 26 metros, desde la entrada exterior de la cueva hasta la parte sumergida del lago (punto 1 al punto 2), con un rumbo de 120°, siendo éste el punto de inicio de las mediciones subacuáticas mediante triangulación (Fig. 67).

El área por prospectar era una pendiente sumergida llena de grandes rocas y guijarros que se extendía a lo largo de toda la entrada del lago como si de un abanico abierto se tratara.

Para maximizar el tiempo de inmersión del equipo se intentó localizar el máximo número de piezas arqueológicas posibles a través de una prospección visual pendular, con la intención de conseguir su geoposicionamiento (Fig. 69.3).

Lamentablemente, el sedimento en suspensión, y la dificultad en la movilidad de los espeleo-buceadores dificultó las tareas prospectivas hasta el extremo. De este modo, y mientras se esperaba a que el sedimento en suspensión permitiera los trabajos de localización de piezas, se trató de medir la capa profunda de limo y fango, depositada en la parte inferior de la pendiente de rocas, con la finalidad de saber si existían restos cerámicos bajo el sedimento y averiguar que ubicación era la más adecuada para realizar un sondeo estratigráfico para su posterior análisis micro-geoarqueológico. Así pues, con la ayuda de una piqueta de aluminio se fueron midiendo las diferentes potencias sedimentológicas de la parte inferior de la zona de derrumbe en la zona NE del área de prospección (Fig. 69.2).

Una vez realizada la prospección inicial, se tomaron una serie de puntos de referencia para crear una base de datos de las distintas potencias sedimentológicas documentadas en la zona más profunda de la pendiente sumergida. Con la ayuda de un flexómetro, de la brújula y del profundímetro se tomaron varios puntos de control.

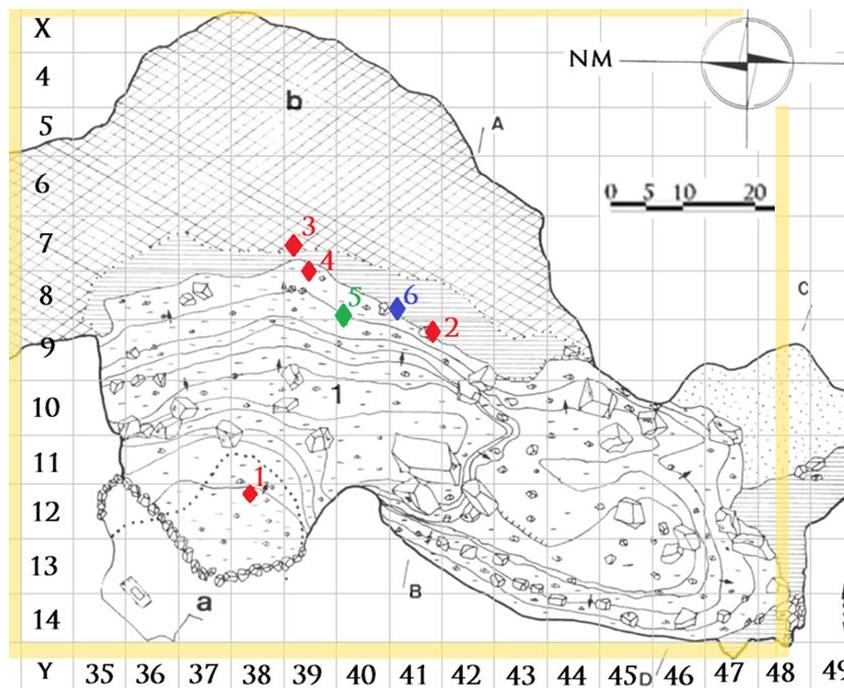
La prospección inicial tenía un carácter práctico y de viabilidad, ya que el objetivo primigenio era encontrar y geo posicionar un lugar adecuado para realizar,

---

decidirá el instrumental a utilizar, el método de observación, la hora de la toma de datos y los métodos de cálculo de gabinete.

posteriormente, un sondeo estratigráfico que nos permitiera extraer el sedimento de forma controlada y, así, estudiar la viabilidad metodológica de esta práctica arqueológica en cuevas sumergidas. Además, esto nos debería permitir conocer la existencia, o no, de más material cerámico enterrado bajo el sedimento.

Una vez realizadas las mediciones programadas de la columna de sedimento, se realizó una prospección visual mucho más exhaustiva y meticulosa, que resultó muy reveladora ya que se encontraron restos cerámicos de diferentes cronologías (Figs. 67 y 69.5).



**Figura 67.** Detalle, sobre la topografía de la cavidad de la cuadrícula general, de la zona prospectada con los puntos de control y la ubicación de las piezas cerámicas más importantes. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 1998).

La prospección visual programada tenía como referencia la generación de unos puntos de control arqueológico y topográfico, los cuales se tomarían, mediante cálculo de eje cartesiano, como referencia para la mejora de nuestro estudio.

- Punto número 2, (ubicado en el cuadrante X; 9 y Y; 41).

El derrumbe compuesto por rocas, guijarros y bloques rocosos colapsados creó un gran cono en el que se entremezclaban materiales de todo tipo y tamaño que al levantarse producían una pequeña nube de sedimento en suspensión que dificultaba la visión, haciendo muy difícil encontrar cualquier tipo de material antrópico si su tamaño no era relativamente grande, lo cual era difícil de conseguir, ya que después de muchos años de expolio por parte de espeleobuceadores aficionados los materiales cerámicos completos y de gran tamaño habían sido los primeros en desaparecer. Por este motivo, se decidió tomar como punto de referencia subacuático el punto núm. 2 para facilitar la medición con el flexómetro y facilitar la visual desde este punto de origen hasta los diferentes puntos de destino.

- Punto número 3, (ubicado en el cuadrante X; 7 y Y; 39).

La ubicación específica de este punto prospectivo estaba a 19.10 metros del punto 2, con rumbo de 40° y a 4.5 metros de profundidad. Allí encontramos una potencia sedimentaria de 1.5 metros. Este punto se encuentra en la parte Norte del lago en la zona más alejada del acceso a la pendiente sumergida, casi entrando en la Galería Negra, continuación del hall de entrada y parte más larga de la cavidad.

- Punto número 4, (ubicado en el cuadrante X; 8 y Y; 39).

A tan solo un metro del punto núm. 3, continuando con rumbo de 50° y a 4.5 metros de profundidad se llevó a cabo el único core de extracción de sedimentos. Este singular core estratigráfico extraído en la cueva nos mostró dos tipos de registro sedimentario, una primera capa de limo arcilloso de unos 9 cm de potencia y una segunda capa de unos 30 cm de potencia, compuesta por materia orgánica descompuesta mezclada con limo. Estas dos capas sedimentarias, al igual

que en la cova Genovesa (Gràcia *et al.*, 2003), son muy comunes en las cuevas mallorquinas sumergidas debido a la gran pendiente de acceso, lo que provoca la escorrentía del agua de lluvia dentro del lago, acumulando todo el sedimento en diferentes capas de limos y arcillas. Así, en esta segunda capa abunda la materia orgánica procedente de fibras vegetales que son arrastradas en momentos de intensas precipitaciones, produciendo así un lavado de la cobertura edáfica (Fig. 68).

Conocedores de que la extracción de este muestra nos generaría escasos resultados óptimos en un análisis micro-geoarqueológico, ya que el nivel del agua no ha bajado más de un metro desde hace 10.000 años, lo que descarta encontrar cualquier resto arqueológico, en lo que se refiere a un hábitat sumergido (Campbell, 2017). Por el contrario, si nos permitió conocer más sobre la evolución geológica de la cavidad, lo cual sirvió para proponer diferentes tipos de hipótesis históricas que contextualicen nuevas líneas de investigación.



**Figura 68.** Imagen en detalle de la diferente estratigrafía obtenida por el core extraído en el punto 4 (Foto; Autor).

- Punto número 5, (ubicado en el cuadrante X; 8 y Y; 40).

A 12.10 metros del punto 2 con rumbo 40° y a 5.10 metros de profundidad, se encontraron una serie de piezas cerámicas fragmentadas enterradas bajo la capa de limo del sedimento. Lamentablemente, las condiciones ambientales hicieron imposible obtener una imagen nítida. Los hallazgos cerámicos fragmentados

encontrados eran de un tamaño muy pequeño y estaban completamente descontextualizados.

- Punto número 6, (ubicado en el cuadrante X; 8 y Y; 41).

El punto número 6 se situó a 9.10 metros del punto 2, con rumbo de 30° y a 3.7 metros de profundidad, siendo, sin duda, el objeto más curioso de los encontrados.

La gran acumulación de bloques de piedra, algunos por encima de otros, cubiertos de sedimentos limosos a menudo escondía estructuras de piedra. En esta ubicación se encontró una singular pieza circular de un metro de diámetro con un agujero en el centro, también circular, que la atravesaba de un lado a otro (Fig. 69.5). Aunque se desconoce la utilidad que se le dio a esta pieza, posiblemente tuviera algún tipo de función de rueda o soporte de alguna estructura en la que se introducía un poste de madera en medio para realizar las funciones de resistencia.

Sin dudarlo, el potencial arqueológico de la cavidad, a pesar de haber pasado miles de años, desde la época premetalúrgica, nos indica la vital importancia de la cova des Drac de Cala Santanyí a la hora de ser utilizada como punto de abastecimiento de agua (Gràcia *et al.*, 1998; Marlasca y López, 2014) (Fig. 69.4).

Los hallazgos del mortero medieval documentados por Gràcia (1998) o la posible rueda de molino localizada en nuestro estudio nos muestra un uso de la cavidad mucho más amplio de lo que cabría pensar, permitiendo generar nuevas hipótesis históricas que deberán ser defendidas y demostradas a través de un análisis más amplio del registro arqueológico remanente aún sumergido (Fig. 69.5).



**Figura 69.** Imágenes de la prospección realizada en la cavidad des Drac de Cala Santanyí; **1.** Imagen de la zona de entrada al lago sumergido en la cova des Drac de Cala Santanyí (punto 2). (Foto; Autor). **2.** Francesc Gràcia introduce una piqueta de aluminio en el sedimento para medir la potencia de éste. (Foto; Autor). **3.** El flexómetro y la brújula indican específicamente la ubicación del área de prospección en la pendiente sumergida. (Foto; Autor). **4.** Fragmentos cerámicos de diferentes tipologías de muy difícil atribución cronológica. (Foto; Autor) **5.** Posible rueda de molino enterrada entre grandes bloques de piedra en medio de la pendiente de derrumbe (Foto; Autor).

#### 7.4.3. Resultados obtenidos en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou

En esta cueva se realizaron dos campañas de prospección y documentación, una primera de estudio preliminar para marcar objetivos y una segunda de recogida de datos. En la primera los resultados fueron aceptables, aunque muy mejorables puesto que las técnicas utilizadas tuvieron que ser repetidas para conseguir una valoración más fiable de la metodología empleada. Y, aunque los trabajos de prospección *in situ* fueron relativamente rápidos, el postproceso de documentación topográfica se alargó mucho en el tiempo debido una carencia de información que tuvo que ser solventada por fuentes externas al proyecto (Fig. 70).



**Figura 70.** Imagen del equipo de intervención subacuática en la campaña de prospección del año 2019. (Foto; Florian Huber).

Ya en la segunda campaña de prospección, la planificación de la campaña de trabajo en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou se presentó compleja y complicada debido a la necesidad de interactuar dos equipos de trabajo simultáneamente, un primer equipo terrestre que se ocupaba de la geolocalización GPS y de las tareas de topografía en superficie y un segundo equipo subacuático que trabajaba dentro del espacio sumergido confinado. Esto provocó una difícil logística y compleja compenetración entre ambas partes, ya que no era posible la comunicación (Figs. 71.1 y 71.2).

Respecto a las diferentes actuaciones subacuáticas, éstas se dividieron por equipos de espeleo-buceadores, cada uno de ellos con unas premisas definidas perfectamente. El primer equipo de inmersión tuvo la tarea de colocación de los dos emisores de radiolocalización sumergibles, uno en la Sala de los Moros, pasado el Pas d'en Judes y otro en la sala aérea de la Galería de las Cónicas. El segundo equipo de espeleo-buceadores realizó las labores de filmación de los trabajos prospectivos y las tareas de mapeo por hilo desde la Galería de las Cónicas hasta la Sala de los Moros, es decir entre un emisor y otro. Y, por último, cuando finalizaron las tareas de ubicación de los emisores comenzó el turno de los espeleo-buceadores que tenían como objetivo la topografía de la cámara aérea de la Sala de los Moros (Fig. 72.1).



**Figura 71.** Campaña de prospección del año 2020. 1. Equipo técnico necesario para las intervenciones subacuáticas. (Foto; Autor). 2. Los espeleo-buceadores Francesc Gràcia y John Kendall durante la parte más compleja de la inmersión para colocar el emisor de radiolocalización. (Foto; Autor).

Al mismo tiempo, el equipo de superficie también se dividió en dos equipos, ya que teniendo una media del cálculo del tiempo de la inmersión de lo que se tardaría en colocar los emisores de radiolocalización, el primer equipo en superficie se fue desplazando hasta los puntos concretos, previamente visualizados en el plano geográfico, donde debían buscar la señal de los emisores. Mientras, el segundo equipo de superficie intentaba conseguir el punto georeferenciado del inicio del hilo guía sumergido lanzando varios puntos con la estación total desde la parte externa de la cavidad, ya que el techo rocoso de la cueva impedía la consecución de una coordenada correcta por falta de señal GPS en su interior (Fig. 72.2).

#### *7.4.3.1. Resultados topográficos y arqueológicos*

Gracias a la mejora de la logística, planificación y profesionalidad del equipo humano se pudo obtener una gran cantidad de datos por parte de los distintos dispositivos utilizados, ya que a medida que avanzaban las campañas de trabajo se perfilaban mejor los objetivos y se disminuía el tiempo de inmersión al maximizar el tiempo de trabajo de fondo. En el estudio de esta cavidad todos los esfuerzos quedaron concentrados en la mejora metodológica topográfica, es decir que se

buscó obtener las coordenadas exactas de la ubicación de los restos cerámicos sumergidos en la Sala de los Moros, ubicada a más de 200 metros de la entrada. Para ello se cotejaron las lecturas obtenidas de los diferentes aparatos utilizados, desde los emisores de radiolocalización, navegadores GPS y lectores de hilo.

Así, en lo que se refiere a evolución técnica y metodológica, observaremos como los resultados fueron mejorando a medida que se fue avanzando hacía una tolerancia topográfica mínima o nula en la obtención de las coordenadas exactas.

#### *7.4.3.1.1. El Sistema de radiolocalización PINGER y SUMMER*

El sistema de radiolocalización fue sin duda el dispositivo que nos dio la mayor fiabilidad durante la primera campaña de prospección (Smith, 2018). En la campaña del año 2019 los espeleo-buceadores colocaron el emisor PINGER pasado el denominado Pas d'en Judas, justo en el techo de la entrada de la Sala de los Moros (Fig. 72.4) tomando en superficie las coordenadas con un dispositivo móvil. Este método no pudo ser mejorado hasta un año más tarde cuando gracias a un GPS diferencial pudimos conocer la ubicación exacta de la señal en superficie correspondiente a la coordenada UTM 31N, X: 523903.38, Y: 4372189.02 (Fig. 72.6). Además, sabiendo que cuando el suelo es horizontal, la profundidad del transmisor o emisor subterráneo con respecto al transmisor es 1.77 veces la distancia a cero (Smith, 2013), pudimos calcular que la distancia a cero de la señal era de unos 19 metros aproximadamente, lo que nos indicó que el techo rocoso entre el transmisor y el receptor era aproximadamente de unos 33.6 metros.

En la segunda campaña no pudimos disponer del PINGER, debido a problemas aduaneros, por lo que utilizamos el dispositivo de radiolocalización SUMMER y MICROSUMMER. En esta ocasión, los espeleo-buceadores colocaron de nuevo el emisor de radiolocalización pasado el denominado Pas d'en Judas, pero esta vez en la línea guía, justo antes de la entrada a la Cámara de los Moros (Fig. 72.3).

Los equipos de trabajo en superficie tuvieron éxito puesto que el topógrafo Pablo Cantuel, encargado de las mediciones, pudo realizar las tareas topográficas

planeadas para la obtención de la coordenada de inicio del MNEMO y el técnico de radiolocalización, Juan Leandro, logró con relativa rapidez tanto la coordenada de los emisores de la Sala de los Moros como el de la Sala de las Cónicas.

Los dispositivos de radiolocalización tenían la función concreta en esta campaña de reforzar la teoría metodológica de concreción de datos y coordenadas de los diferentes dispositivos topográficos electrónicos utilizados. Lamentablemente, esto no fue así, quedando muy lejos la lectura de sus datos respecto a nuestras perspectivas.

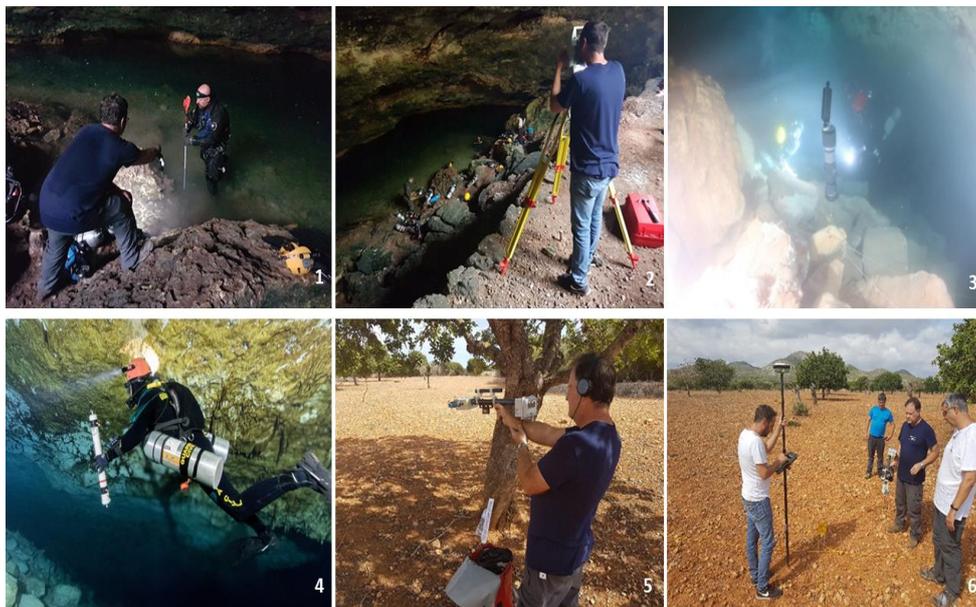
Respecto al uso de estos dispositivos se estableció un plan de actuación, donde se dieron unas pautas a seguir a los espeleo-buceadores para ubicar las balizas emisoras correctamente niveladas en los puntos fijados de la línea del hilo guía, donde ambas balizas quedarían activas hasta el día siguiente cuando serían retiradas. Los equipos emisores utilizados para dicho fin fueron las balizas sumergibles SUMMER Y MICROSUMMER, que se ubicaron en la Sala de los Moros y en la Sala Cónicas respectivamente (Fig. 72.3).

En superficie se utilizaron dos receptores; el WINTER y el ULC-1 (Fig. 72.5). El equipo de trabajo en superficie se desplazó a la zona estimada de la Galería de las Cónicas, según estimación de la topografía manual. Aunque la primera baliza debía ser la primera en emitir la señal ésta no era recibida en la posición estimada, procediendo a realizar una batida en su búsqueda. Poco después, apareció la señal, pero bastante retirada de lo previsto, debido a la colocación inexacta del punto fijado por el emisor. Estaba presente algo de ruido de banda que entorpeció la audición, pero se obtuvo un triángulo de error aceptable<sup>50</sup> (Leandro y Díez de la Rubia, 2017). Seguidamente, entro a funcionar la baliza SUMMER, ubicada en la Sala de los Moros, a la hora programada. Se pudo establecer el corte de sólo dos rumbos fijando la zona cero. Había presente una anomalía en la zona próxima a la zona cero, siendo una zona ovaloide en vez de circular, pero, no se pudo indagar más debido a la interferencia entre ambas balizas.

---

<sup>50</sup> Establecimiento de tres puntos de referencia distintos, cuyos rumbos van a atravesar la zona de tierra cero, produciendo un triángulo de error, en el que en su interior se calcula la coordenada geográfica.

Finalmente, la recepción de la señal de los diferentes emisores quedó muy alejada de donde se creía que debían estar ubicados. Esto se debió, posiblemente, a una mala ubicación del emisor MICROSUMMER muy cerca del SUMMER, lo cual interfirió en la señal en el momento en el que estaban conectados los dos a la vez, dando un error de más de 22.26 metros respecto al punto 59 del MNEMO, considerado éste como el punto correcto de referencia donde debía colocarse el emisor SUMMER de la Sala de los Moros (Fig. 72.6).



**Figura 72.** Diferentes trabajos terrestres y subacuáticos en la campaña de prospección del año 2020; **1.** El espeleobuceador John Kendall sostiene el prisma reflectante ubicado en el punto a medir, en este caso un punto sumergido desde donde parten las líneas guía sumergidas. (Foto; Autor). **2.** El topógrafo Pablo Cantuel con ayuda de una estación total mide las distancias y ángulos en la entrada de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Foto; Autor). **3.** Dispositivo emisor de radiolocalización SUMMER en la parte sumergida de la Sala de los Moros con una pequeña inclinación. (Foto; John Kendall). **4.** Miembro del equipo de los GEAS colocando el radiolocalizador PINGER en el techo de la Sala de los Moros (Foto; Florian Huber). **5.** El técnico electrónico Juan Leandro utilizando el receptor portátil ULC-1 tratando de localizar la ubicación del SUMMER en la Sala de los Moros. (Foto; Autor). **6.** Tras ubicar sobre el terreno el triángulo de error de la recepción de la baliza emisora el equipo en superficie procedió a tomar las coordenadas con GPS diferencial. (Foto; Autor). Fuente; (Fumás, 2022b).

Este punto tomado por el técnico en radiolocalización Juan Leandro en la Sala de los Moros tenía una coordenada, tomada en esta ocasión con GPS diferencial de UTM 31N, X: 523886.7, Y: 4372199.44, la cual estaba muy alejada de nuestro punto de referencia, dando por fallida la toma de datos de los sistemas de radiolocalización en la campaña 2020.

A diferencia del PINGER utilizado en la campaña 2019, colocado en flotabilidad positiva en el techo de la Sala de los Moros, los dispositivos de Leandro ubicados en el suelo o en la línea obtuvieron un mal resultado.



**Figura 73.** Imagen del software ARIANE donde aparece el punto topográfico (estrella amarilla) a 22,26 m del punto 59 del MNEMO. Fuente; elaboración propia.

Y, respecto al punto de ubicación en superficie de la señal del SUMMER, ubicado esta vez en la Galería de las Cónicas, éste también apareció mucho más lejos de los cálculos más pesimistas previstos (Fig. 74).

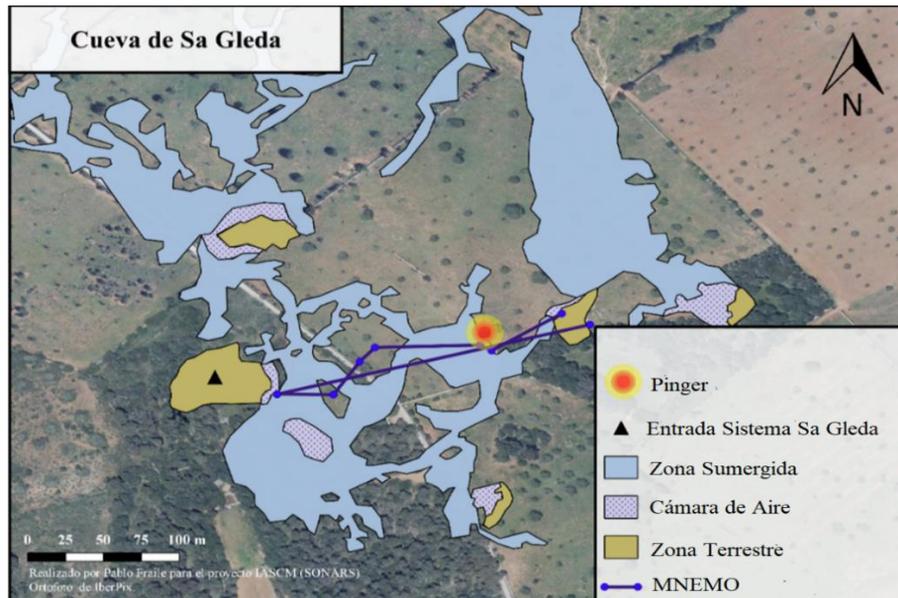


**Figura 74.** Imagen del software ARIANE donde aparece el punto topográfico (estrella amarilla) a 41.12 m del punto final del MNEMO (línea negra) en la Galería de las Cónicas. Fuente; elaboración propia.

Debemos decir que en este punto no teníamos una línea de MNEMO de ida y vuelta que pudiera corroborar la lectura del emisor de radiolocalización, por lo cual solo nos pudimos orientar por la línea de ida del MNEMO y por la topografía clásica del SEB (éstas dos últimas coincidentes). Lamentablemente la señal de este último receptor apareció a 41.12 metros de distancia de su ubicación teórica en la playa de guijarros aérea en la Sala de las Cónicas, con unas coordenadas UTM 31N, X: 524019.8, Y: 4372205.9, estando también muy alejado de nuestro cálculo inicial (Fig. 74).

#### 7.4.3.1.2. El sistema de mapeo por hilo MNEMO

En la primera campaña de prospección en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou no fue posible realizar una lectura correcta con el MNEMO puesto que debido a la falta de experiencia en el uso de este dispositivo por parte de los miembros del equipo de inmersión obteníamos constantemente lecturas erróneas. Esto obligaba a repetir las lecturas una y otra vez, con el considerable gasto económico y logístico que ello suponía (Fig. 75).



**Figura 75.** Ortofotomapa donde se visualizan las líneas de lectura de hilo erróneas obtenidas con el MNEMO (línea azul) en la campaña de prospección y documentación del año 2019. (Autor; Pablo Fraile).

Por otro lado, para poder dar por válida una lectura completa en el MNEMO era necesario repetir la medición de la línea tanto de ida como de vuelta, para poder cerrar la poligonal de estudio, y conseguir que esta superposición de línea tuviera un porcentaje de error inferior al 2%. Solo entonces podíamos decir que estábamos dentro de una tolerancia topográfica aceptable (Pereda y Sánchez, 2013; Kister, 2017; Fumás, 2022b) (Fig. 75).

En la figura anterior, realizada con el software QGIS durante la primera campaña, vemos el solapamiento de la topografía manual de la cueva realizada por el GNM sobre ortofotomapa. En ella observamos, en primer lugar, como la topografía previa presentaba ciertos errores puesto que el emisor PINGER se colocó en la Sala de los Moros y éste, según la topografía, aparece muy alejado de esa ubicación. En segundo lugar, las dos líneas de lectura del MNEMO eran distintas y terminaban muy lejos de donde se encontraba el emisor de PINGER, el cual era nuestro punto de referencia final. Esto es debido a que las lecturas fueron tomadas por dos buceadores diferentes sin experiencia previa con el dispositivo. De este modo, podemos apreciar como el primero de ellos hizo cinco tracks o segmentos en la línea diferentes, concretamente en los puntos de línea donde ésta cambia de

rumbo dentro de la cavidad. Por otro lado, el otro buzo, hizo que el MNEMO fuera en modo continuo, sin detenerse a hacer tracks diferentes. Ambas lecturas dieron una lectura errónea de más de 20 metros de diferencia y un error en el acimut de más del 40%, debido a la falta de práctica con este dispositivo y al hecho de tener un tiempo limitado en la inmersión (Fig. 75).

#### *7.4.3.1.2.1. Evaluación externa de los resultados. El KECP*

Después de analizar los errores cometidos con el MNEMO, en el año 2020, nos pusimos en contacto con Gian Ameri, miembro del Karst Exploration and Conservation Project (KECP), de la British Caving Association<sup>51</sup> y de la British Cave Research Association<sup>52</sup>, los cuales durante mucho tiempo habían estado llevando a cabo tareas de mapeo por hilo con el MNEMO en varias cuevas de Mallorca, incluida la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Ameri intercambió con nosotros las lecturas correctas MNEMO obtenidos por el software ARIANE (Fig. 76).

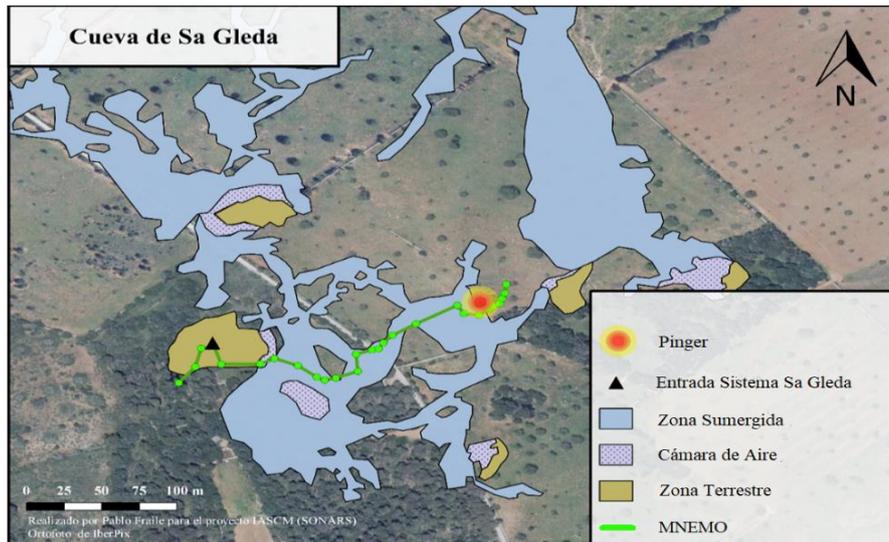
Así, y tal como se puede observar en el siguiente ortofotomapa, la línea de mapeo obtenida por el KECP pasaba junto a la coordenada de la ubicación donde estaba ubicado el emisor de radiolocalización PINGER. De esta manera, las dos coordenadas tomadas con dos dispositivos diferentes eran coincidentes, lo que indicaba que su línea de mapeo por hilo podría ser correcta.

Además, cuando superpusimos la topografía escalada del Grup Nord Mallorca (GNM) sobre el ortofotomapa también observamos que los puntos georreferenciados tomados por los dos dispositivos mencionados anteriormente con la topografía clásica no coincidían. Concretamente había una desviación de unos 50 metros, ya que tanto la línea MNEMO como el emisor de PINGER se colocaron después de cruzar el Pas d'en Judas, concretamente al entrar en la Sala de los Moros.

---

<sup>51</sup> <https://british-caving.org.uk/>

<sup>52</sup> <https://bcra.org.uk/>



**Figura 76.** Ortofotomapa realizado con SIG con el solapamiento de la planta de la cavidad donde aparece la línea de lectura correcta del MNEMO (en verde) junto al PINGER. (Autor; Pablo Fraile).

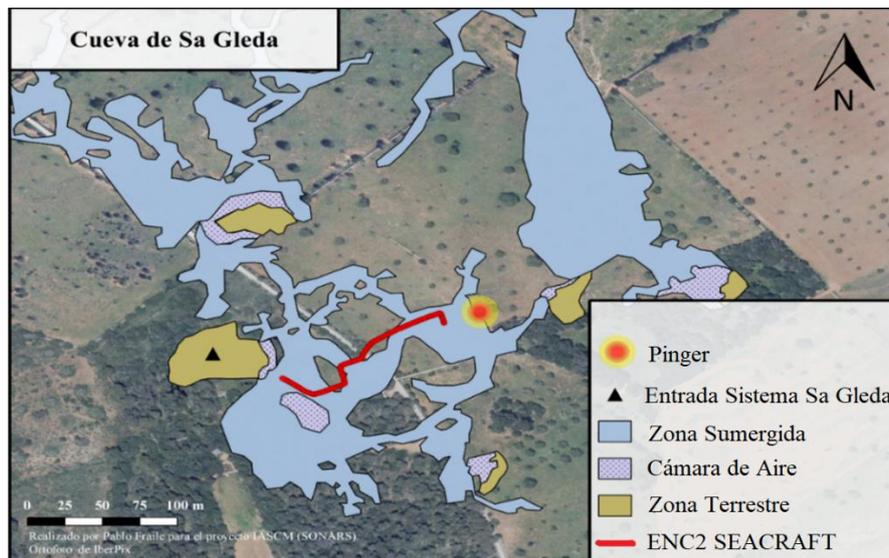
En definitiva, la distancia directa entre los puntos de entrada y PINGER se estimó en 222.80 metros. Había tres datos topográficos que se podían estimar entre estos dos puntos de referencia basados en los datos obtenidos por diferentes metodologías. Así, el porcentaje de error estimado para cada uno de los resultados calculados sobre una base de una línea recta de 222.80 metros entre los dos puntos geográficos fue:

1. Grup Nord de Mallorca (GNM) y Universitat de les Illes Balears (UIB) mediante topografía manual/tradicional fue del 16,78%.
2. KECP mediante lectura del MNEMO fue del 5,2%.
3. SONARS mediante los usos de dos dispositivos MNEMO fue del 21,31%.

#### 7.4.3.1.3. El sistema de mapeo con GPS del dispositivo ENC2 de SEACRAFT

Finalmente, quedaba por añadir los datos de la lectura del último dispositivo topográfico que utilizamos en la presente tesis, y que buscaba validar las

mediciones que habíamos tomado hasta ahora. El ENC2 de SEACRAFT<sup>53</sup> (Guía ENC, 2019) todavía estaba en sus primeras etapas de experimentación, lo que significaba que el dispositivo tenía que hacer una calibración continua para tomar los tracks correctamente. La primera lectura del ENC2 fue tomada desde la entrada de la Sala Francesc Ripoll hasta el final del Pas d'en Judas para evaluar la viabilidad del dispositivo y calcular el margen de error en comparación con los otros métodos utilizados. Así, el primer punto que fue tomado por la ENC2 fue el comienzo de la línea sumergida en el lago a la entrada del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou y el último punto fue la entrada al Pas d'en Judas, ya que para hacer la lectura correcta el ENC2 necesitaba hacer lecturas lineales sin detenerse, cosa que al pasar por el Pas d'en Judas no era posible<sup>54</sup> (Fig. 77).



**Figura 77.** Ortofotomapa con la superposición de la planta de la cueva y con el track desde la entrada sumergida hasta el Pas d'en Judes tomado con el dispositivo ENC2 de SEACRAFT en la campaña 2019. (Autor; Pablo Fraile).

<sup>53</sup> El ENC2 fue mejorado en fábrica tras estas pruebas con la creación del ENC3 <https://seacraft.eu/products/navigation-console/enc3/>.

<sup>54</sup> Como veremos más adelante el sistema de mapeo ENC2 presentó importantes carencias en el acimut al atravesar pasos angostos e irregulares puesto que en un principio es un dispositivo pensado para trabajar en aguas abiertas donde este tipo de obstáculos son inexistentes. El ENC2 se presentó como una herramienta útil de mapeo siempre y cuando conociéramos la coordenada de salida del track y los segmentos a mapear fueran lineales y amplios.

Hay que decir que el dispositivo ENC2 no tenía por qué coincidir con la línea del MNEMO, ya que el mapeo por hilo sigue la línea guía, que suele estar ubicada en los distintos puntos de anclaje cerca de las paredes de la cavidad, mientras que el dispositivo ENC2 debe ir montado sobre un escúter de aluminio, pasando siempre por el centro de la galería y creando pistas mucho más lineales con lecturas continuas. Una vez superpuesta la lectura del ENC2 con el mapa SIG georreferenciado sobre el ortofotomapa pudimos ver que este dispositivo también había tenido problemas importantes de calibración que provocaron que su lectura fuera incorrecta. Tras una evaluación posterior y una búsqueda exhaustiva de errores en los resultados, debemos decir que tanto las distancias como las direcciones de las galerías de la cueva estaban bien representadas en las lecturas tomadas por el ENC2 de SEACRAFT, aunque el resultado no fuera satisfactorio.

#### *7.4.3.2. Resultados generales obtenidos en las campañas de prospección*

La gran complejidad técnica de la prospección arqueológica de la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou se veía atenuada en la última campaña por el trabajo previamente hecho ya en la campaña 2019, por los trabajos de mapeo por hilo de Gian Ameri del KECP y por la topografía actualizada de la SEB. Pero, aun así, los resultados otra vez más fueron dispares, y aunque el esfuerzo y la compenetración entre equipos fue óptima no todos los objetivos se cumplieron.

Ciertamente el hecho de que un equipo humano realice una campaña de prospección sin una experiencia previa de trabajo juntos, más los complejos problemas intrínsecos que conllevan este tipo de prospección donde existe un gran esfuerzo logístico, un cansancio mental por tantas horas de planificación y un importante cansancio físico debido a la necesidad de exprimir el trabajo de campo, tanto dentro como fuera de la cavidad. Estos factores adversos tan solo pudieron ser paliados gracias a la profesionalidad, conocimiento y buen hacer de cada uno de los miembros del equipo. Por este motivo, vamos a enumerar uno a uno los resultados obtenidos durante las campañas de trabajo para contextualizar los trabajos prospectivos y focalizar los puntos conseguidos y los puntos de mejora en la prospección arqueológica del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou.

#### 7.4.3.2.1. La obtención de la coordenada real de inicio de las líneas topográficas

Hasta la fecha todo método topográfico subacuático utilizado en la presente investigación tenía como finalidad última la obtención de coordenadas precisas de los restos arqueológicos sumergidos dentro de las cavidades. El problema aparecía siempre en el cálculo de la primera coordenada que servía como referencia para el resto de las lecturas y las lecturas de los dispositivos de mapeo.

Ciertamente uno de los trabajos más precisos en esta área lo había llevado a cabo el equipo del KECP pero no con la ayuda o con los conocimientos de un topógrafo profesional, es decir utilizando una estación total y un GPS diferencial.

La estación total es un instrumento que realiza la medición de ángulos a partir de marcas realizadas en discos transparentes. Las lecturas de distancia se realizan mediante una onda electromagnética portadora (generalmente microondas o infrarrojos) con distintas frecuencias que rebota en un prisma ubicado en el punto a medir y regresa, tomando el instrumento el desfase entre las ondas.

Para la obtención de las coordenadas de la línea de entrada del MNEMO el dispositivo realizó una serie de lecturas y cálculos sobre ellas. Las lecturas que se obtuvieron fueron ángulos verticales, horizontales y distancias (Pachas, 2009).

Tras la campaña de 2019 sabíamos la gran dificultad que comportaba cualquier tipo de intervención en una cavidad sumergida, y más aún si cabe cuando hablamos de una cavidad de las dimensiones del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Gràcia *et al.*, 2007, 2010; Fumás, 2022b). Por esta razón, en la campaña del año 2020 contamos con la colaboración de un topógrafo profesional quien, tras realizar los cálculos oportunos, tanto dentro como fuera de la cavidad, consiguió la coordenada exacta del inicio de la línea guía sumergida en la Sala de Entrada, la cual se bifurcaba hacia el Sector Ponent y hacia el Sector Clàssic, requisito fundamental para no acumular errores evitables desde un comienzo y para la obtención de coordenadas precisas en el interior (Tabla 5).

RESULTADOS CÁLCULO DE COORDENADAS RED SA_GLEDA							
COORDENADAS BASES ERTS 89, UTM31				PRECISIONES			DESCRIPCIÓN
ID. PUNTO	X(m)	Y(m)	H(m)	px(m)	py(m)	pH(m)	
1005	523694.385	4372101.325	35.335	0.020	0.020	0.022	Vértice observado con GPS
1004	523693.899	4372102.355	35.304	0.020	0.020	0.022	Vértice observado con GPS
1003	523690.479	4372097.823	36.089	0.020	0.020	0.022	Vértice observado con GPS
1002	523694.685	4372099.998	35.337	0.020	0.020	0.022	Vértice observado con GPS
1000	523736.73	4372117.036	5.668	0.059	0.052	0.040	Poligonal exterior
1001	523697.848	4372104.076	34.604	0.008	0.008	0.004	Poligonal exterior
5000	523747.072	4372113.998	-0.27	0.062	0.065	0.045	Inicio del MNEMO

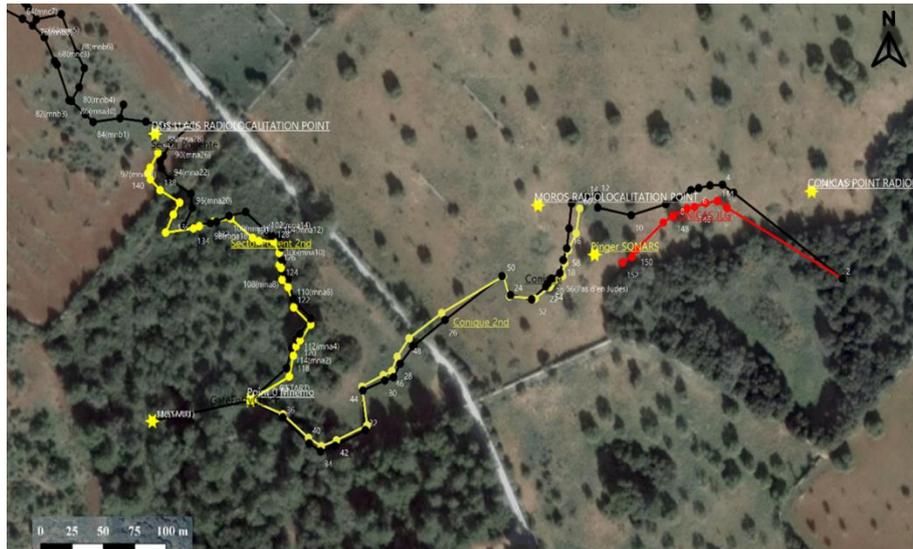
**Tabla 5.** Coordenadas obtenidas a través del cálculo con la estación total y el GPS diferencial. (Autor; Pablo Cantuel).

De este modo, toda línea prospectiva subacuática debe tomar como referencia la coordenada de inicio UTM 31N, X: 523747.072, Y: 4372113.998.

#### 7.4.3.2.2. Lecturas obtenidas del sistema de mapeo por hilo MNEMO

La técnica del mapeo por hilo con el dispositivo MNEMO fue sin duda una técnica fiable con poco margen de error, siempre y cuando se dispusiera del tiempo necesario para realizar las lecturas completas de las distintas galerías de la cavidad. La necesidad de obtener una calibración perfecta del dispositivo, de repetir varias veces el mismo track de ida y de vuelta para cotejar errores y el hecho de tener un conocimiento previo de la cavidad a mapear no era una tarea sencilla. Por esta razón, en la campaña del año 2020 disponíamos previamente de las líneas de mapeo de KECP, con los datos de lectura correctos del MNEMO desde la Sala de Entrada hasta la Galería de las Cónicas (Fig. 78).

Los datos más rigurosos obtenidos por las lecturas del mapeo por hilo del KECP eran los tomados desde la Sala de Entrada hasta la Sala de los Moros y desde la Sala de Entrada hasta la Sala Dos Llacs (Fig. 78). Ambos tracks tenían lecturas de ida y de vuelta coincidentes lo que hacía que prácticamente se cerrara el cálculo de la poligonal a estudio (línea negra ida y la línea amarilla vuelta).



**Figura 78.** Líneas de MNEMO desde la Sala de Entrada hasta la Sala de las Cónicas superpuesta sobre ortofotomapa, reflejado en el software ARIANE. Fuente; elaboración propia.

Nuestro trabajo programado en la última campaña fue completar la poligonal de vuelta desde la Sala de las Cónicas hasta la Sala de los Moros (línea roja), lo cual nos hubiera permitido cerrar esa poligonal y completar los trabajos del KECP en el Sector Clàssic. El problema apareció al comprobar la línea del MNEMO en el software ARIANE, puesto que observamos que, aunque las distancias eran muy similares no así el acimut de la línea. Esto pudo ser provocado por la modificación de esas líneas de hilo guía por parte de otros equipos de exploración y topografía que trabajan simultáneamente en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Ésta siempre es la parte no controlable del trabajo puesto que, aunque las líneas no deberían ser modificadas, algunas veces, debido a su deterioro o a comportamientos subjetivos, otros equipos cambian esas líneas con un afán de mejora de éstas. De este modo, la línea para nosotros prioritaria desde el comienzo de la presente tesis siempre había sido la ubicada entre la Sala de Entrada y la Sala de los Moros y ésta no había sido modificada, además, teníamos los datos correctos de ida y de vuelta del MNEMO.

Una vez que supimos que la línea era correcta podíamos conocer en qué coordenadas exactas se encontraba el área de los restos arqueológico de la Sala de los Moros. Ese punto concreto era coincidente tanto con la línea de ida del MNEMO, en el punto 16 (línea negra en la Fig. 78), como de vuelta, en el punto

59 del mismo (línea amarilla en la Fig. 78), con coordenadas UTM 31N, X: 523905.3, Y: 4372187.1, con una profundidad de 3.83 metros. El punto de esa coordenada concreta fue cotejado con una medición manual en la que efectivamente 3.80 metros era la profundidad correcta. Una vez comprobados todos los datos decidimos ponernos en contacto con Gian Ameri, responsable de mapeo del KECP en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou, y nos informó que la diferencia de un 10% entre la línea negra y amarilla tras atravesar el Pas d' en Judes se debía a que la primera sufrió una modificación al estirarse el hilo al colocar la nueva línea en la Galería Cinc Cents, la cual tensionó la línea y modificó su trazado original (línea negra en la Fig. 78).

#### *7.4.3.2.3. Lecturas obtenidas del sistema de mapeo ENC2 de SEACRAFT*

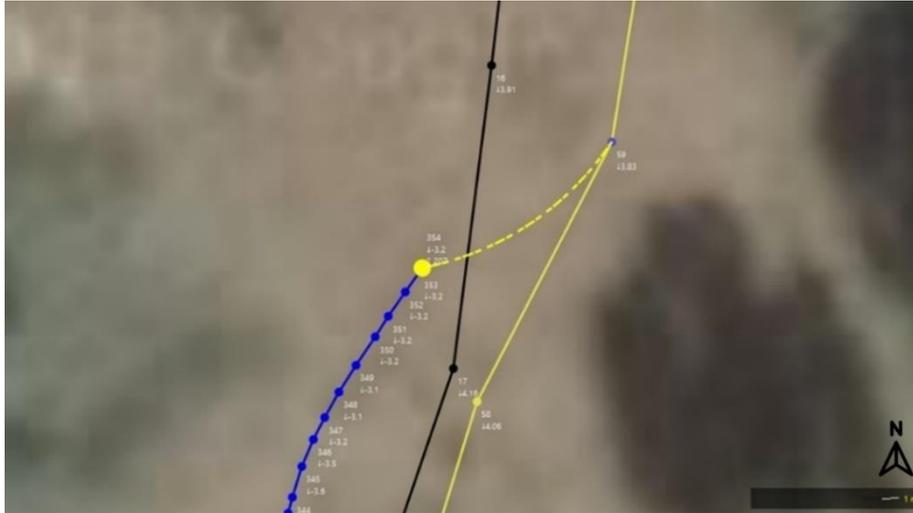
Una vez más, quedaba por añadir los datos de la lectura del último dispositivo electrónico topográfico que utilizábamos, y que buscaba validar las mediciones que habíamos tomado hasta ahora con el MNEMO. El ENC2 de SEACRAFT, una vez calibrado totalmente, realizó un track desde la Sala Francesc Ripoll, pasando por el Pas d' en Judas hasta llegar al emisor de radiolocalización SUMMER ubicado al comienzo de la Sala de los Moros. Así, el primer punto fue tomado por el ENC2 en la línea divisoria del hilo guía en la Sala Francesc Ripoll, puesto que debido a la falta de visibilidad no se pudo comenzar en la Sala de Entrada. El punto de comienzo del track del ENC2 coincide con el punto 36 del MNEMO de ida (línea negra) con coordenadas UTM 31N, X: 523762.8, Y: 4372106.5, siendo el punto final relativamente cercano al punto 16 del MNEMO de ida (línea negra de la Fig. 79).



**Figura 79.** Línea del ENC2 (color azul) completamente coincidente con las líneas de MNEMO (color negro) excepto en el Pas d'en Judes. Fuente; elaboración propia.

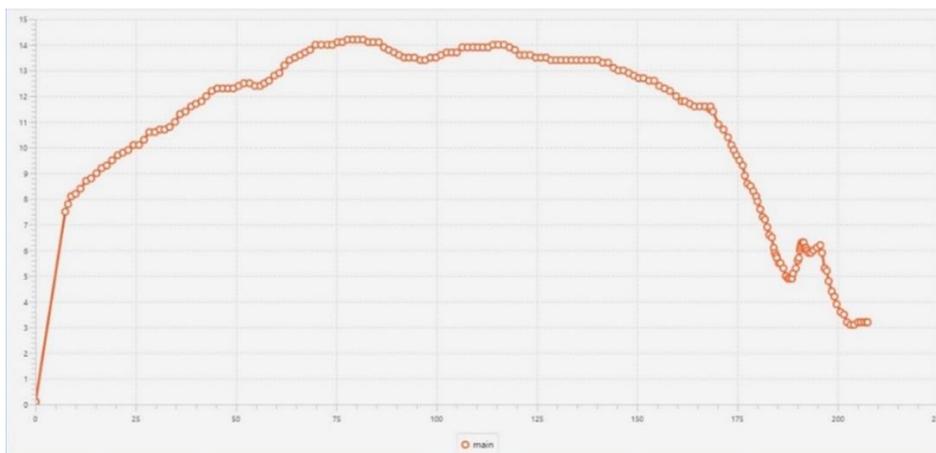
La distancia entre el punto 59 (línea amarilla) y el final del track del ENC 2 era exactamente de 6.5 metros. Esta desviación, según los técnicos del ENC 2 Carles Ramoneda y Joel Borrazas, podía ser debida al problema de calibración que sufrió el dispositivo a su paso por la restricción de acceso que nos encontramos al llegar al Pas d'en Judas, ya que para hacer las lecturas correctas el ENC2 necesitaba recorrer pistas lineales sin detenerse, cosa que al atravesar el Pas d'en Judas no era posible (Fig. 80).

Esta casuística en este dispositivo era similar a la ocurrida en la campaña del año 2019 por lo que este problema era algo intrínseco en las mediciones del acimut, cosa que debe ser corregida de fábrica, haciendo inevitable el error cuando ocurre esta situación.

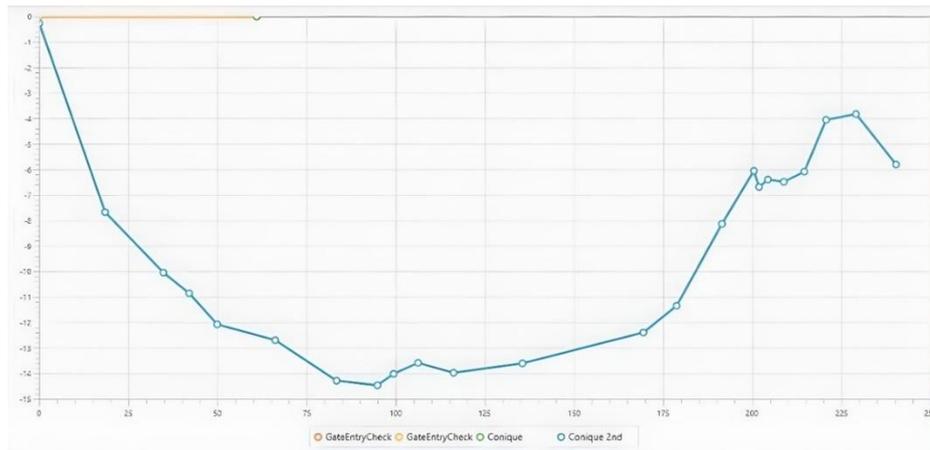


**Figura 80.** Imagen del software del ARIANE donde se aprecia el error de 6.50 metros desde el punto final de lectura del ENC2 y el punto 59 del MNEMO. Fuente; elaboración propia.

Analizando más meticulosamente los datos de profundidad de ambos dispositivos, MNEMO y ENC2, observamos que, aunque la profundidad registrada por los dispositivos no tendría por qué ser coincidente al tomar lecturas independientes en ubicaciones distintas, los gradientes de profundidad son muy similares, lo que nos garantizó que las lecturas fueron correctas durante la inmersión (Gráficos 7 y 8).

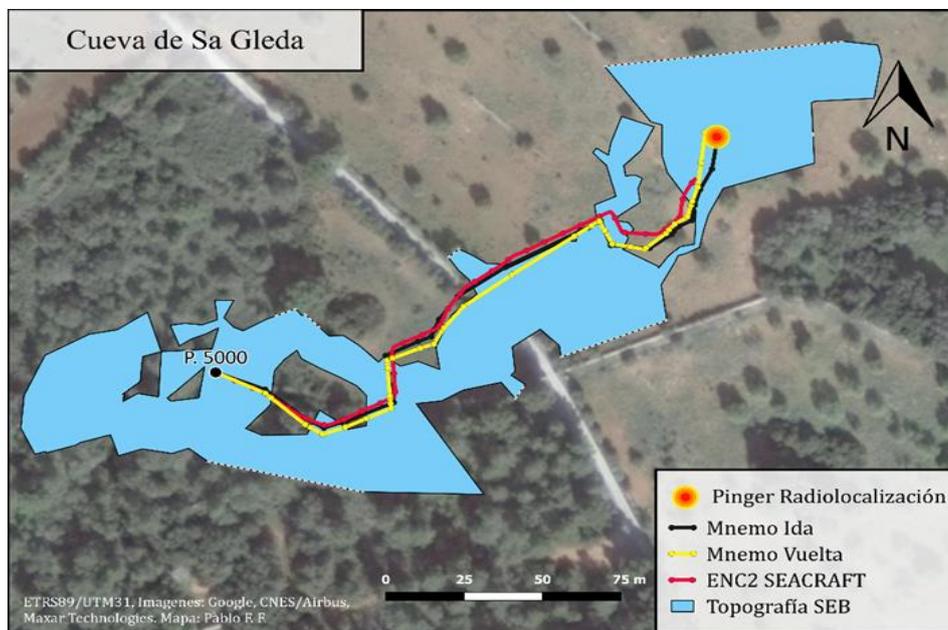


**Gráfico 7.** Lectura de las distintas profundidades tomadas por el ENC2 en el software ARIANE. Fuente; elaboración propia.



**Gráfico 8.** Lectura de las distintas profundidades tomadas por el MNEMO en el software ARIANE. Fuente; elaboración propia.

Los técnicos del ENC2 hicieron un esfuerzo para conseguir tomar el track entero, desde el comienzo hasta el final del segmento de línea deseado, con un total de 198 estaciones o lecturas (Fig. 81).



**Figura 81.** Ortofotomapa con el solapamiento de la topografía donde se aprecian las lecturas de los distintos dispositivos utilizados (PINGER, MNEMO y ENC2 de SEACRAFT). (Autor; Pablo Fraile).

Durante los 207 metros de recorrido los técnicos del ENC2 intentaron posicionarse lo más cerca de la línea guía. Esto, sin duda, minimizó las divergencias entre ambos dispositivos y nos ayuda a la comprensión del track del ENC2 y del MNEMO, ya que nuestra intención final era cotejar ambas lecturas con el fin de obtener una coordenada coincidente final.

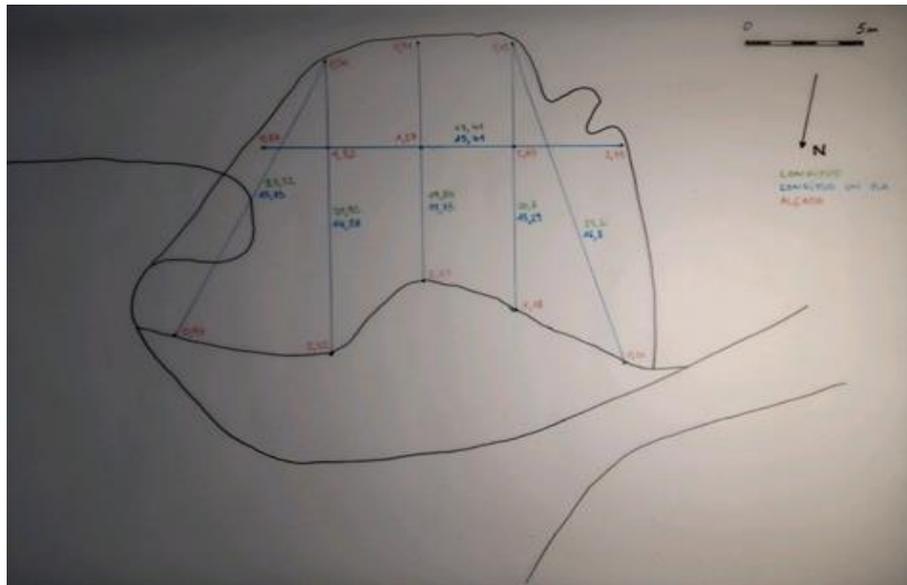
#### 7.4.3.2.4. La topografía obtenida de la sala aérea de la Sala de los Moros

En la última campaña de investigación uno de los trabajos adicionales y primordiales para completar la prospección arqueológica de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou era la realización de la topografía de la sala aérea de la Sala de los Moros, la cual no se había topografiado rigurosamente (Bellet, 1957; Ginés, 1993; Vasseur, 2006; Fernández, 2008; Ramis y Santandreu, 2011; Davila y Camacho, 2012). La topografía de este espacio era imprescindible ya que allí era donde se habían encontrado los restos arqueológicos, y era necesario contextualizarlos espacialmente en su ubicación real dentro de la misma sala y de la cueva (Fig. 82).



**Figura 82.** Vista de la cámara aérea confinada denominada Sala de los Moros. (Foto; Florian Huber).

La primera fase en la realización de la topografía fue el alzado de la burbuja, dibujado a partir de las medidas tomadas previamente. Primero se marcaron con rotulador los puntos que se utilizaron, a partir de los cuadrantes que se hicieron allí, con líneas métricas para agilizar la toma de datos (Fig. 83).

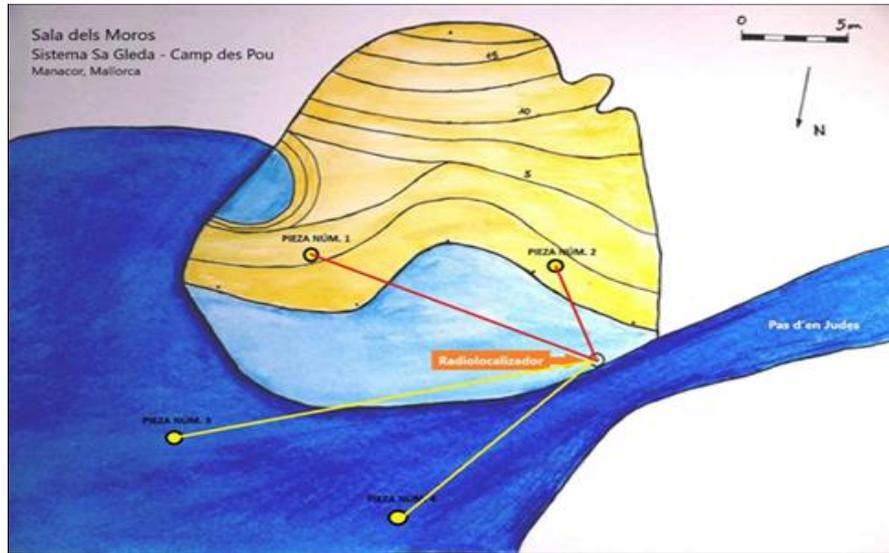


**Figura 83.** Topografía de la Sala de los Moros realizada mediante cuadrantes utilizando cintas métricas entrecruzadas. (Autor; Marc Pintor).

Los trabajos topográficos en la sala aérea consistieron en la realización de una serie de cuadrantes empleando líneas métricas entrecruzadas como método para conseguir puntos de referencia, distancias o longitudes (total y en plano) y alturas de todos los puntos de los cuadrantes para, posteriormente, dibujar los perfiles y las curvas de nivel de la burbuja y así diferenciar la parte seca emergida de la parte sumergida y, dentro de ésta, la que tiene techo sumergido y la que no. Para ello se utilizaron un distanciómetro láser<sup>55</sup> marca Leica, modelo Disto D110 de 1,5 mm de precisión, una brújula de mano marca Suunto, modelo Kd-14/360R G

<sup>55</sup> Los distanciómetros láser funcionan según el principio del tiempo de vuelo. El medidor emite una señal de láser a un objetivo y se calcula el tiempo que tarda dicha señal en ir y volver al medidor. Entonces se calcula la distancia basándose en este dato debido que la velocidad de la luz es constante.

de 2° sexagesimales de precisión y un inclinómetro digital<sup>56</sup> modelo PRO3600 capaz de medir el ángulo con respecto a la horizontal con una precisión de 0, 1° sexagesimal (Fig. 84).



**Figura 84.** Primer boceto de la topografía realizada con la ubicación de las diferentes piezas arqueológicas y paleontológicas encontradas. (Autor; Marc Pintor).

La finalidad de realizar esta observación fue la de levantar la geometría de la cámara contextualizando el posible punto de aguada y con ello documentar métricamente la morfología del terreno donde se encontraban las cuatro piezas arqueológicas encontradas y denominadas como Y-01, Y-02, Y-03 e Y-04.

Una vez conseguida la topografía in situ de la parte aérea de la Sala de los Moros era necesario conseguir la ubicación de los distintos elementos arqueológicos y paleontológicos ubicados en la sala. Para ello se trazaron una serie de líneas con cinta métrica entre la pieza arqueológica y la coordenada de referencia en nuestro estudio, la cual correspondía a la estación 59 del MNEMO de la línea guía amarilla, coincidente con el punto 22 del cálculo de la propagación de errores del estudio topográfico. De este modo, tal solo nos quedaba aplicar el cálculo trigonométrico del teorema de Pitágoras para conocer exactamente la ubicación de

<sup>56</sup> Un inclinómetro es un instrumento de medición que sirve para medir la inclinación de un plano respecto a la superficie terrestre.

cada una de las piezas cerámicas en cuadrícula georreferenciada. Para ello, partimos de la coordenada conocida del punto 22, medimos la distancia entre ese punto de referencia (punto 0) hasta la ubicación donde se encuentra la pieza (punto 1) anotando la distancia, el rumbo y la profundidad. Por último, realizamos el cálculo del cuadrado del cateto (b) a través del teorema de Pitágoras, ubicando la pieza respecto a la coordenada de origen. De este modo, pudimos conocer su coordenada exacta, su ubicación en planta, su ubicación sobre la topografía clásica y sobre plano SIG (Tabla 6).

Núm. Pieza	Profundidad (m) (Cateto A)	Distancia (m) (Hipotenusa)	Acimut	Cálculo (m) (Cateto B)
Y-01	-0,60	5	105°	4.963869458
Y-02	-2,50	14	60°	13.77497731
Y-03	-5.3	12	350°	10.76615066
Y-04	-4.4	20	40°	19.50999744

**Tabla 6.** Datos obtenidos tras la medición manual de la dispersión cerámica en la Sala de los Moros aplicando trigonometría para el cálculo del cateto B. Fuente; elaboración propia.

Una vez conocida la topografía de la sala y añadidos los puntos de la ubicación de los distintos objetos arqueológicos y paleontológicos, calculados mediante medición manual y trigonometría, tan nos solo quedaba conocer su coordenada y registrarlos correctamente a través de un estudio topográfico. Para ello debíamos transformar las coordenadas de polares a cartesianas<sup>57</sup> y añadir las topografías manuales al software AUTOCAD y a los Sistemas de Información Geográfica a través del programa QGIS (Figs. 85, 86 y 87).

De este modo, y tal como se ha comentado con anterioridad, debido a la complejidad en la realización de lecturas muy cortas en el mapeo por hilo del MNEMO y al tratar de utilizar metodologías prospectivas complementarias, se decidió realizar mediciones manuales para el cálculo de la dispersión cerámica en

<sup>57</sup> Para realizar la transformación de coordenadas polares a coordenadas cartesianas, si se dispone de las coordenadas polares, es decir, el rumbo y la distancia de un punto, solo hay que seguir la siguiente fórmula:  $X= D \text{ sen}R$   $Y= D \text{ cos}R$  siendo D la distancia reducida y R el rumbo.

la Sala de los Moros. Es necesario mencionar que para efectuar esta radiación<sup>58</sup> se debía tener visibilidad y accesibilidad directa entre el polo de radiación, punto 22, y cada uno de los restos arqueológicos encontrados, denominados o codificados en la campaña como Y-01, Y-02, Y-03 e Y-04 (Tabla 7).

Pieza	Cateto A	Hipotenusa (m)	Acimut	Cateto B (m)	Coord. X (m)	Coord. Y(m)	H (m)
Y-01	0,6	5	105°	<b>4,963869458</b>	523907,09	4372199,21	0,69
Y-02	2,5	14	60°	<b>13,77497731</b>	523915,95	4372193,23	2,71
Y-03	-5,3	12	350°	<b>10,76615066</b>	523903,24	4372200,88	-8,24
Y-04	-4,4	20	40°	<b>19,50999744</b>	523913,93	4372204,8	-7,35

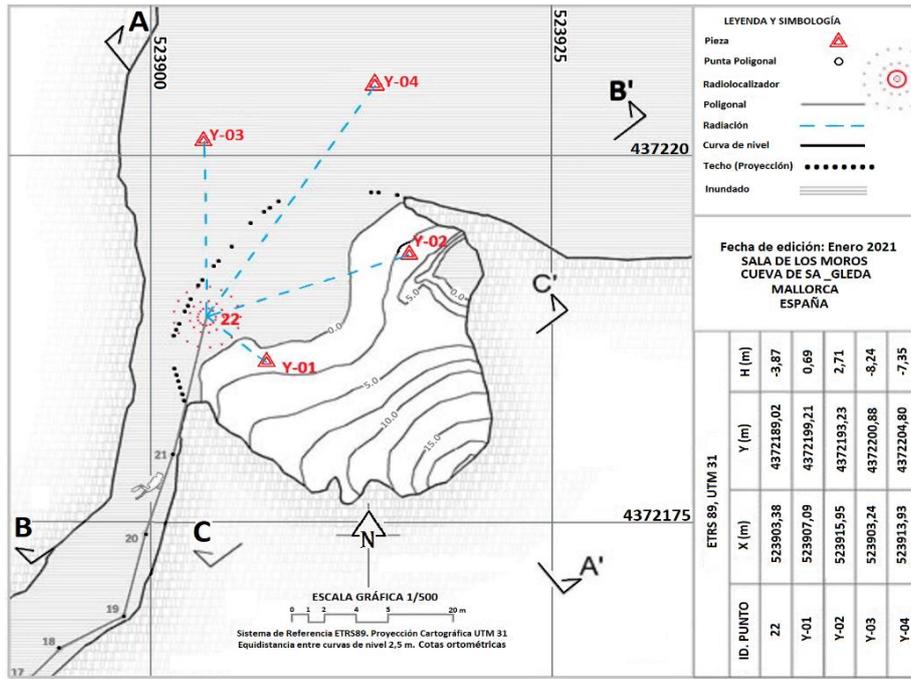
**Tabla 7.** Cálculo de la dispersión cerámica a través del método de radiación de topografía manual aplicada en la Sala de los Moros para la obtención de las cuatro coordenadas pertenecientes a los remanentes arqueológicos. (Autor; Pablo Cantuel).

La finalidad de realizar esta radiación era obtener una documentación geométrica fiable y georreferenciada de los restos arqueológicos, mientras se contextualizaban entre ellos mismos y su entorno inmediato, además de ser capaces de replantear<sup>59</sup> su ubicación en campañas futuras, detectar posibles expoliaciones y, en definitiva, obtener una documentación del geoposicionamiento del yacimiento (Figs. 88, 89, 90, y 91).

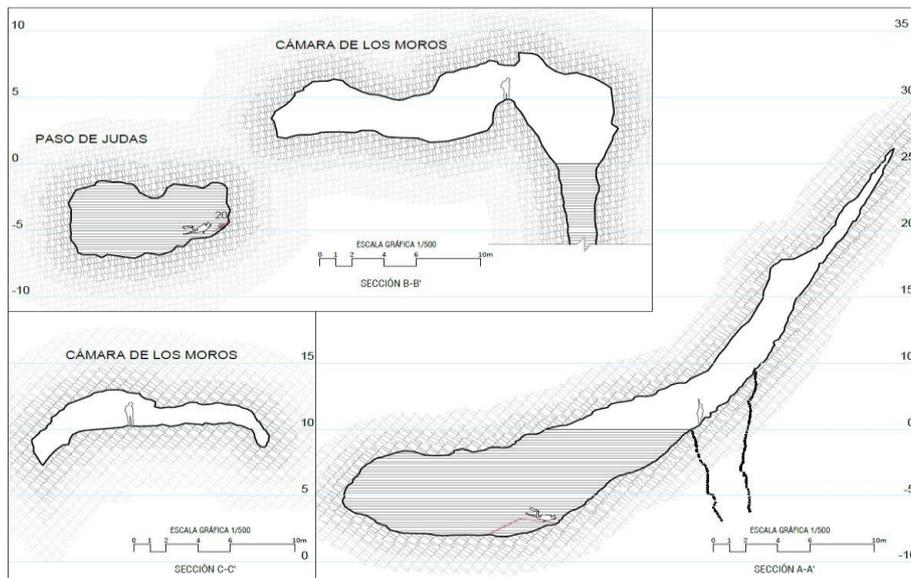
---

<sup>58</sup> La radiación se utiliza para tomar los detalles en torno a un punto conocido. Muchas veces el punto conocido es una estación de la poligonal, y la orientación angular se hará a la base anterior o siguiente. Es un método adecuado para hacer un levantamiento de una zona con visibilidad desde un punto.

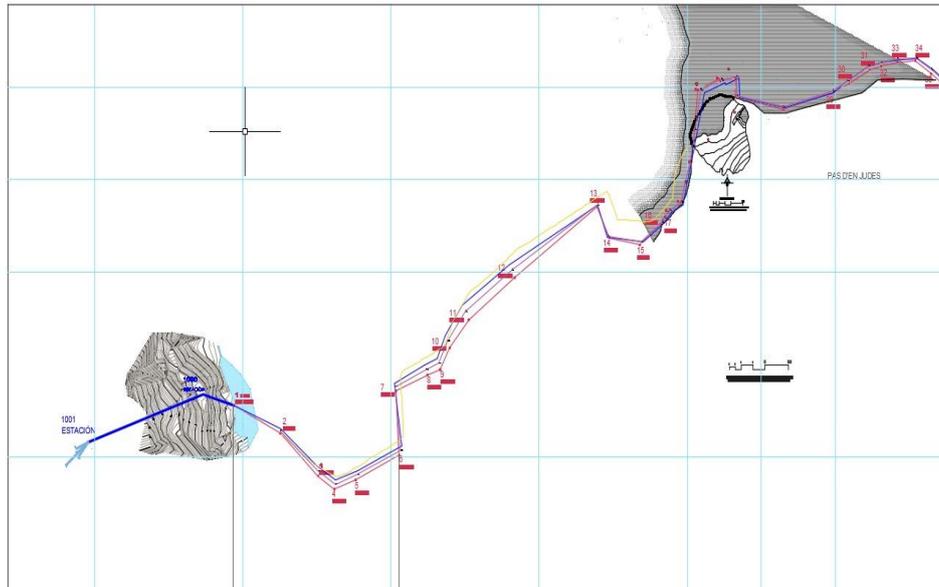
<sup>59</sup> El replanteo topográfico es una operación en la que se marcan sobre el terreno los puntos o lindes básicos del proyecto. Explicado de forma muy simple, realizar esta tarea no es otra cosa que realizar unas marcas sobre el terreno que indiquen toda la información que hay contenida en los planos.



**Figura 85.** Plano realizado en Autocad donde se muestra la topografía de la Sala de los Moros y los restos arqueológicos remanentes geo posicionados a través del conocimiento de la coordenada del punto 22 del MNEMO coincidente con la coordenada del PINGER (Autor; Pablo Cantuel).



**Figura 86.** Plano escalado de alzado y perfil de la Sala de los Moros en la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Autor; Pablo Cantuel).



**Figura 87.** Plano topográfico realizado con Autocad donde se aprecian los cálculos preliminares en la obtención de la coordenada de inicio del MNEMO denominado punto 5000, la topografía de la Sala de los Moros y las diferentes líneas de medición de la poligonal de ida y vuelta del MNEMO y del ENC2 de SEACRAFT (Autor; Pablo Cantuel).

Los escasos restos cerámicos y óseos encontrados apenas podían darnos información sobre su tipología o cronología, pero sí del método topográfico en sí mismo utilizado para su geoposicionamiento. Debemos pensar que el objetivo marcado en la cova del Sistema Sa Gleda- Camps des Pou era la validación de una metodología extrapolable a otros casos de estudio, donde la importancia de sus yacimientos arqueológicos o paleontológicos sean iguales o mayores que éste.

Sin lugar a duda, el expolio y la mala praxis entre los distintos espeleo-buceadores que han trabajado durante años en ésta y otras cavidades de Mallorca ha dejado mermado cualquier remanente arqueológico válido para ser estudiado. Lo que si es cierto es que, aunque pocos, estos restos fragmentados nos indican un uso antrópico de la cavidad.



#### Pieza Y-01

**Figura 88.** Fragmento de cerámica con abundante desengrasante y el aspecto negruzco de la pasta presente en fractura, nos indican que se tratan de una producción indígena (Foto; Miguel Ángel Perelló).



#### Pieza Y-02

**Figura 89.** Fragmento cerámico rojizo inclasificable tipológicamente debido a su pequeño tamaño (Foto; Miguel Ángel Perelló).



#### Pieza Y-03

**Figura 90.** Restos de cerámica fragmentada ubicada entre grandes rocas en la parte sumergida de la Sala de los Moros. La pieza, al igual que las anteriores, no se movió de su lugar por lo que no pudimos identificar bordes o asas que pudieran servirnos para identificarla (Foto; John Kendall).



#### Pieza Y-04

**Figura 91.** Fragmentos óseos de pequeño tamaño en muy mal estado de conservación. Probablemente sea una parte de hueso de lepórido (Foto; John Kendall).

#### 7.4.3.2.5. Resultados del uso del ecosonda manual<sup>60</sup>

Las herramientas utilizadas por los espeleo-buceadores para la realización de la topografía de la Sala de los Moros fueron el flexómetro, el distanciómetro laser, el clinómetro y las pizarras de escritura. Esta tarea, planificada desde un principio, tenía que ser facilitada con el uso de un ecosonda manual que nos indicara las distancias entre el emisor y la pared de obstáculo, tanto dentro como fuera del agua, y así de este modo se podrían haber representado los patrones de zonificación<sup>61</sup> horizontal para extraer estimaciones aproximadas del pasaje en sección transversal. Este método podría haber ayudado al diseño de muestreo de estudios prospectivos futuros, permitiendo mejorar las características topográficas y la distribución espacial de la zona a estudio permitiendo el cálculo de datos volumétricos de los antiguos puntos de acceso a la cavidad (Gerovasileiou *et al.*, 2013).

La realidad fue que el ecosonda dio lecturas erróneas en todo momento, agravada quizás por la existencia de espeleotemas o por la haloclina del agua. Lo cierto es que, a diferencia de los posibles resultados obtenidos en otras cavidades cársticas sumergidas donde la inexistencia de espeleotemas pueda facilitar la obtención de datos volumétricos fiables, en la casuística concreta de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou esto no fue posible, ralentizando incluso las tareas de topografía y prospección, por lo que se decidió prescindir de su uso.

---

<sup>60</sup> Los equipos de ecosonda manual cuentan con transductores, elementos capaces de generar ondas sonoras. Se podría decir que son altavoces con orejas, ya que estos transductores se pueden modificar para que dirijan el haz de ondas hacia todas las direcciones, estableciendo opciones muy útiles para la topografía submarina.

<sup>61</sup> La zonificación, en sentido amplio, nos indica la división de un área geográfica establecida en sectores heterogéneos conforme a ciertos criterios previos.

#### 7.4.3.2.6. Resultados de la aplicación de métodos topográficos convencionales de superficie

Los métodos topográficos convencionales en superficie son una serie de técnicas que permiten, mediante la utilización de distintos dispositivos electrónicos, levantar la superficie del terreno o diversos sucesos ocurridos sobre él. Este tipo de metodología se encuentran suficientemente extendida, puesto que las aplicaciones de la topografía convencional en superficie tienen gran aplicación, no solo para las labores arqueológicas de documentación de yacimientos en superficie, sino en construcción, propiedad, industria, etc. Por este motivo, el grado de especialización, se encuentra suficientemente extendido, pese a ser requerido (Bailey, 1984; Fernández, 2008; Pachas, 2009).

Las características técnicas con las que cuentan los modernos dispositivos de topografía de superficie consiguen obtener precisiones milimétricas globales en los levantamientos topográficos<sup>62</sup> que realizan. Además, desde la aparición de los sistemas GPS, las labores de georreferenciación han experimentado una considerable reducción de tiempos de observación, debido a que, gracias a la utilización de este tipo de equipos, se pueden obtener directamente coordenadas con precisiones globales por debajo del centímetro (Fernández, 2008).

En nuestro caso, el estudio de topografía convencional tuvo como objetivo enlazar todos los métodos mencionados y obtener la georreferenciación de los resultados. Ésta se dirigió en la observación directa de las coordenadas de una serie de vértices, marcados en el terreno mediante el empotramiento de clavos de acero que rodeaban la depresión de la entrada a la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou, para ser usados como puntos fijos en el proceso de cálculo posterior de la red que compone el total de vértices hasta el punto 5000 o inicio de la poligonal que discurría hacia el entorno sumergido (Fig. 92).

---

<sup>62</sup> El levantamiento topográfico es un estudio técnico y descriptivo de un terreno, examinando la superficie terrestre en la cual se tienen en cuenta las características físicas, geográficas y geológicas del terreno, pero también sus variaciones y alteraciones.

Para ello, se empleó un levantamiento RTK<sup>63</sup> (Real Time Kinematic) de estas coordenadas usando un equipo GPS, marca Leica, modelo GS16, mediante el servicio de posicionamiento en tiempo real y diferencial GNSS (Global Navigation Satellite System), conectando con la Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes (ERGNSS por su nombre en inglés) facilitada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y mediante una solución VRS [Estaciones de Referencia Virtual, por su siglas en español] (Leica-Geosystems, 2020b).

Asimismo, con la finalidad de obtener las coordenadas georreferenciadas del final de la poligonal sumergida, se observó con la misma metodología el punto replanteado en superficie, mediante la tecnología de radiolocalización PINGER, punto que correspondía a la vertical del punto 22.

La tabla siguiente muestra las coordenadas de estos puntos observados con GPS en el sistema ETRS 89, proyección cartográfica UTM (Universal Transverse Mercator) para el huso 31 y altura ortométrica (con respecto al nivel medio del mar en Alicante), así como sus precisiones de la observación directa (Tabla 8).

COORDENADAS BASES ERTS 89, UTM 31				PRECISIONES MÁXIMAS		
ID. PUNTO	X(m)	Y(m)	H(m)	px(m)	py(m)	pH(m)
1005	523.694.385	4.372.101.325	35.335	0,015	0,015	0,015
1004	523.693.899	4.372.102.355	35.304	0,015	0,015	0,015
1003	523.690.479	4.372.097.823	36.089	0,015	0,015	0,015
1002	523.694.685	4.372.099.998	35.337	0,015	0,015	0,015
22*	523.903.377	4.372.189.020	-3.870	0,015	0,015	0,100

**Tabla 8.** Coordenadas de los puntos observados con GPS para la obtención del punto 22 o punto final de la poligonal a estudio. La obtención de la cota ortométrica del punto 22 fue posible gracias a que se conocía por otros medios convencionales de superficie la cota ortométrica de la lámina de agua vertical medida directamente en campo con cinta métrica entre el radiolocalizador y la lámina de agua (Autor; Pablo Cantuel).

<sup>63</sup> El levantamiento RTK es similar al cinemático, pero resuelve las coordenadas de los puntos medidos en tiempo real. Se suele utilizar para levantamientos topográficos con GPS de alta precisión en áreas pequeñas.

Debido a que la entrada al espacio sumergido se encontraba dentro de la cavidad, y en este tipo de entornos los aparatos GPS no son capaces de conectarse con los satélites, para obtener la coordenada georreferenciada del punto 5000 o inicio de la poligonal sumergida, se utilizó una estación total topográfica, marca Leica modelo TS16, con una precisión angular de 1 segundo sexagesimal (1'') y una precisión en la medida de distancias de un milímetro más 1.5 ppm<sup>64</sup>. Gracias a ella, se observó una red topográfica de vértices que partía de los puntos observados con tecnología GPS. La observación de todos los puntos que componen esta red densificada se realizó mediante topografía clásica, imponiendo dos premisas de obligado cumplimiento que aseguraban la eliminación de errores sistemáticos y la compensación de accidentales; la observación mediante Regla de Bessel<sup>65</sup> (círculo directo e inverso) y la observación, desde cualquier base, de todas las demás visibles desde ella (Leica-Geosystems, 2020a).

Por último, se hizo un levantamiento topográfico convencional georreferenciado por el método de radiación de puntos, que definían la geometría planimétrica y altimétrica de la entrada a la cavidad en el umbral con el entorno sumergido y que devolvían la cota del nivel del agua en el momento de la observación. Para ello, se utilizó de nuevo la estación total topográfica, marca Leica, modelo TS16; con la cual se observó un vértice de coordenadas conocidas para obtener su desorientación y, mediante el método de radiación, algunos puntos singulares que definían la geometría de la cavidad y que marcaban el nivel del agua en el momento de la toma de datos.

A partir de la utilización de estos métodos de topografía convencional de superficie, la poligonal que discurría por la cavidad tenía una mayor fidelidad, pues el inicio y el final de ésta habían sido observados con la suficiente precisión como para considerarlos puntos fijos en la posterior rutina de cálculo y obtener así una poligonal cerrada o comprobada<sup>66</sup>. De este modo, los resultados se tensaron y,

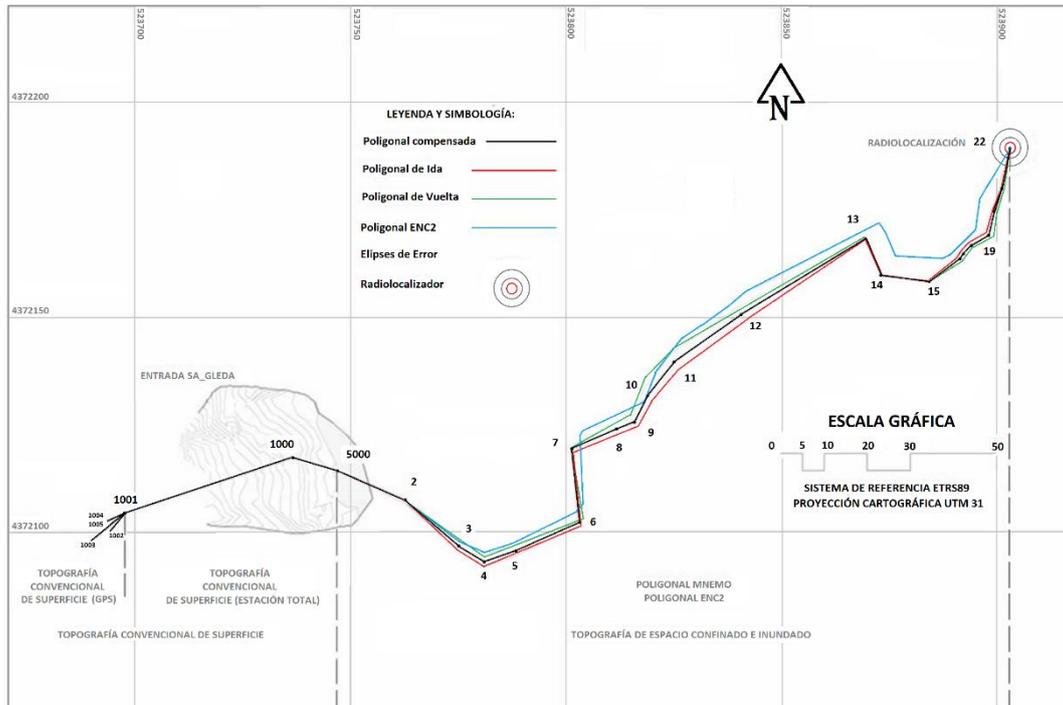
---

<sup>64</sup> Partes por millón (ppm).

<sup>65</sup> La regla de Bessel es el procedimiento que permite la obtención de un ángulo desde la medición de direcciones angulares conjugadas. Al ángulo según Bessel se le adjuntan los valores de lados de un polígono, obteniéndose por proceso las coordenadas de vértices del polígono y su superficie.

<sup>66</sup> Este método permite controlar la precisión del levantamiento topográfico y consiste, como su nombre lo indica, en iniciar la poligonal en un punto y terminar en el mismo punto.

si las precisiones estaban por debajo de la tolerancia esperada, se podía asegurar la viabilidad geométrica del conjunto de los métodos empleados (Fig. 92).



**Figura 92.** Representación de los puntos en superficie obtenidos por GPS diferencial y estación total y estudio topográfico de la poligonal cerrada en la parte sumergida, realizado a través del estudio de los diferentes dispositivos de mapeo junto con sistemas de radiolocalización. (Autor; Pablo Cantuel).

#### 7.4.3.2.7. Resultado de los cálculos en la obtención de coordenadas georreferenciadas

Una vez finalizada la campaña de campo, se procedió a establecer una rutina de cálculo con la finalidad de obtener los resultados del levantamiento topográfico georreferenciado efectuado, es decir, obtener las coordenadas georreferenciadas de los puntos que definen el yacimiento.

El sistema de referencia elegido para la obtención de resultados fue el sistema de ETRS 89, la proyección cartográfica empleada la UTM para el huso 31 y la altura estaba referida al nivel medio del mar en Alicante (altitud ortométrica), debido a que era el sistema oficial de referencia utilizado en el territorio español, siendo

por esta razón por la que la mayor parte de las bases de datos espaciales vienen referidas en dicho sistema.

Primeramente, y gracias al programa de cálculo topográfico TOPCAL 21<sup>67</sup>, donde se introdujeron las observaciones de campo que componen la red entre los puntos observados con tecnología GPS en superficie y el inicio de la poligonal, punto 5000, observada por el método MNEMO y que correspondían al primer punto de la poligonal sumergida, se calcularon las coordenadas iniciales (mediante la herramienta del cálculo poligonal). Posteriormente, éstas se compensaron (mediante la herramienta de cálculo de compensación mínimo-cuadrática) las coordenadas de los puntos que definían dicha red.

La tabla siguiente muestra las coordenadas que componen dicha red, así como sus precisiones (Tabla 9).

RESULTADOS_COORDENADAS RED SA_GLEDA							
COORDENADAS RED ERTS 89, UTM31				PRECISIONES			EQUIPO
ID. PUNTO	X(m)	Y(m)	H(m)	px(m)	py(m)	pH(m)	
1005	523694,385	4372101,325	35,335	0,015	0,015	0,015	GPS
1004	523693,899	4372102,355	35,304	0,015	0,015	0,015	GPS
1003	523690,479	4372097,823	36,089	0,015	0,015	0,015	GPS
1002	523694,685	4372099,998	35,337	0,015	0,015	0,015	GPS
1000	523736,73	4372117,036	5,668	0,059	0,052	0,040	ESTACIÓN TOTAL
1001	523697,848	4372104,076	34,604	0,008	0,008	0,004	ESTACIÓN TOTAL
5000	523747,072	4372113,998	-0,27	0,062	0,065	0,045	ESTACIÓN TOTAL

**Tabla 9.** Coordenadas georreferenciadas obtenidas por topografía clásica de superficie con estación total. El punto 5000 (color amarillo) indica la coordenada exacta de la entrada al pozo de acceso a la cova de la Font de Ses Aiguades. (Autor; Pablo Cantuel).

Gracias a este cálculo, se obtuvieron las coordenadas de inicio de la poligonal observada por el método del mapeo por hilo MNEMO. Debido a que las precisiones obtenidas tenían un orden bastante menor a las obtenidas por el método MNEMO éstas se pudieron considerar puntos fijos en las posteriores rutinas de cálculo de la poligonal del entorno sumergido.

<sup>67</sup> El programa informático Topcal21 es un potente gestor de datos topográficos y geodésicos y una herramienta de cálculo eficaz, sencilla y productiva que permite al usuario resolver todo tipo de problemas de cálculo y organización de datos topográficos, desde la toma de datos en campo hasta el replanteo.

Por su parte, en el ARIANE, software capaz también de interpretar los datos procedentes de los aparatos MNEMO y ENC2, se exportaron los datos de la observación realizada por ambos dispositivos al programa de hojas de cálculo Excel, en el cual se realizó un primer tratamiento de los datos. La finalidad era, primero, corregir los acimuts observados con respecto al norte magnético a acimuts orientados con respecto al norte de la cuadrícula, a partir de la aplicación de la corrección por declinación magnética<sup>68</sup> y la corrección por la convergencia de meridianos<sup>69</sup>.

En segundo lugar, obtuvimos el ángulo vertical, es decir, el ángulo que comprende la visual con respecto a la vertical del lugar, de cada observación entre los puntos consecutivos obtenidos en campo. Posteriormente, transformamos todos los valores angulares expresados en grados sexagesimales a grados centesimales, lo que mejoró las labores de cálculo y, por último, preparamos las observaciones según la rutina de cálculo del programa Topcal21.

La tabla siguiente muestra las observaciones de ida y vuelta de la poligonal realizada por el método MNEMO, así como sus desviaciones. En ella, se puede apreciar que la desviación máxima de las observaciones acimutales ascendía a 7.13° centesimales, 0.97 metros para el caso de la distancia geométrica y 7.18° centesimales para el caso del ángulo vertical, aunque las desviaciones medias eran tolerables. Con ello, se dieron por buenas las observaciones de campo y se introdujeron las mismas en una rutina de cálculo mediante el programa de cálculo topográfico Topcal 21 (Tabla 10).

---

<sup>68</sup> La declinación magnética en un punto de la Tierra es el ángulo comprendido entre el norte magnético local y el norte verdadero (o norte geográfico). En otras palabras, es la diferencia entre el norte geográfico y el indicado por una brújula (el denominado también norte magnético). La declinación magnética (Dm) además de variar con los años, varía según el lugar donde nos encontremos; por ello en las cartas náuticas viene dado su valor y su incremento o decremento anual.

<sup>69</sup> La convergencia de los meridianos en un punto es el valor angular de la imagen (en la proyección) del meridiano que pasa por ese punto. En esta proyección, los meridianos convergen en un punto, mientras que los ejes Norte de la proyección son paralelos.

POLIGONAL DE IDA					POLIGONAL DE VUELTA					DESCIACIONES		
ID. EST.	ID. VIS.	AZ (CENTE)	V (CENTE)	Dg (m)	ID. EST.	ID. VIS.	AZ (CENTE)	V (CENTE)	Dg (m)	AAZ	ADg	AV
5000	1	128,42	125,85	18,91	1	5000	323,94	72,72	18,48	4,48	0,43	1,43
1	2	146,31	108,86	17,31	2	1	344,16	90,73	16,34	2,15	0,97	0,41
2	3	136,31	108,04	6,59	3	2	333,11	92,85	7,23	3,20	0,64	0,89
3	4	78,70	109,51	7,66	4	3	278,61	90,09	7,87	0,09	0,21	0,40
4	5	72,42	102,72	16,18	5	4	273,78	97,57	16,28	1,35	0,10	0,29
5	6	395,70	105,69	17,47	6	5	190,66	94,11	17,21	5,04	0,26	0,20
6	7	75,15	101,56	11,44	7	6	271,28	99,00	11,44	3,87	0,00	0,56
7	8	79,70	93,43	4,56	8	7	274,89	106,28	4,57	4,81	0,01	0,29
8	9	32,03	95,38	6,76	9	8	225,05	104,01	6,83	<b>6,98</b>	0,07	0,61
9	10	43,81	102,77	9,90	10	9	239,66	97,51	9,97	4,15	0,07	0,28
10	11	59,48	98,55	19,26	11	10	261,44	101,22	19,33	1,96	0,07	0,24
11	12	61,42	97,76	33,81	12	11	268,55	102,27	33,91	7,13	0,10	0,03
12	13	170,81	91,09	9,39	13	12	377,78	107,17	9,34	6,96	0,05	1,74
13	14	111,65	82,61	10,86	14	13	305,78	116,25	12,71	5,87	<b>1,85</b>	1,14
14	15	56,09	85,53	9,14	15	14	260,89	114,93	8,95	4,80	0,19	0,46
15	16	38,98	121,23	1,65	16	15	236,61	71,60	1,46	2,37	0,19	<b>7,18</b>
16	17	46,09	95,32	2,86	17	16	247,89	107,49	2,47	1,80	0,39	2,81
17	18	64,53	101,46	4,79	18	17	269,94	98,72	4,47	5,41	0,32	0,18
18	19	17,53	95,32	5,85	19	18	211,61	104,43	5,75	5,93	0,10	0,25
19	20	20,87	77,11	5,77	20	19	218,83	121,56	6,11	2,04	0,34	1,33
20	21	7,98	98,18	8,77	21	20	202,44	101,75	8,39	5,54	0,38	0,07
21	22	7,37	111,73	11,62	22	21	209,94	88,72	11,23	2,57	0,39	0,45
<b>DESVIACIONES MEDIAS</b>										<b>4,02</b>	<b>0,32</b>	<b>0,96</b>

**Tabla 10.** Observaciones de campo de la poligonal de ida y vuelta realizadas con el dispositivo de mapeo MNEMO y desviaciones entre la poligonal de ida y vuelta (en color algunas de las desviaciones más importantes y los valores de las desviaciones medias). (Autor; Pablo Cantuel).

Para el cálculo de las coordenadas compensadas de los vértices que componen la poligonal observada con el aparato MNEMO, se introdujeron como puntos fijos los puntos 5000 y 22, obtenidos por metodología GPS en superficie, así como todas las observaciones de campo realizadas con el MNEMO. Primero, se lograron las coordenadas iniciales de todos los vértices de la poligonal y, posteriormente, se ajustaron mediante la herramienta de compensación mínimo-cuadrática<sup>70</sup>, dejando como puntos fijos los puntos 5000 (inicio de la poligonal) y el 22 (fin de la poligonal); de manera que se obtuvieron las coordenadas georreferenciadas compensadas y las precisiones a posteriori de los puntos que componen la poligonal. La tabla siguiente muestra esas coordenadas georreferenciadas que componen la poligonal y las precisiones de los 22 puntos que la definen (Tabla 11).

<sup>70</sup> Los mínimos cuadrados están formados por cuatro elementos como hipótesis de partida: un modelo matemático, un modelo estadístico, el condicionamiento de mínimo y unas hipótesis estadísticas.

COORDENADAS COPENSADAS				PRECISIONES		
ID. PUNTO	X <sub>comp.</sub> (m)	Y <sub>comp.</sub> (m)	H <sub>comp.</sub> (m)	P <sub>X</sub> (m)	P <sub>Y</sub> (m)	P <sub>H</sub> (m)
5000	523747,1	4372114	-0,27	0,065	0,065	0,045
1	523762,72	4372107,16	-7,71	0,035	1,328	0,060
2	523775,34	4372096,29	-10,10	0,408	2,390	0,090
3	523781,21	4372092,74	-10,92	0,324	2,350	0,110
4	523788,46	4372095,27	-12,10	0,509	2,426	0,030
5	523803,25	4372101,92	-12,75	0,744	2,154	0,100
6	523801,41	4372119,07	-14,33	0,586	1,746	0,070
7	523811,84	4372123,74	-14,56	0,868	2,382	0,170
8	523816,09	4372125,33	-14,10	0,976	2,708	0,150
9	523819,03	4372131,43	-13,64	1,614	3,096	0,090
10	523825,08	4372139,29	-14,05	2,083	<b>3,548</b>	0,130
11	523840,76	4372150,52	-13,64	1,679	3,105	0,060
12	523869,57	4372168,17	-12,44	0,386	0,072	0,080
13	523873,21	4372159,64	-11,26	0,555	0,455	<b>0,180</b>
14	523884,48	4372158,14	-8,19	1,410	0,333	0,100
15	523891,47	4372163,48	-6,12	1,653	0,315	0,120
16	523892,27	4372164,67	-6,71	1,474	0,486	0,030
17	523894,06	4372166,63	-6,46	1,260	0,832	0,110
18	523898,08	4372168,91	-6,56	1,176	1,331	0,130
19	523899,39	4372174,54	-6,14	0,629	1,304	0,100
20	523901,10	4372179,86	-4,11	0,570	0,905	0,100
21	523903,58	4372187,93	-3,97	<b>3,334</b>	2,157	0,080
22	523903,38	4372189,02	-3,87	0,015	0,015	0,1

**Tabla 11.** Coordenadas georreferenciadas compensadas de la poligonal cerrada interior de la cueva. En azul se indican las coordenadas y las precisiones del primer y el último punto de la poligonal y en amarillo los puntos donde se consiguió mayores precisiones en X, Y y H. (Autor; Pablo Cantuel).

Al igual que cuando se operó con las observaciones de campo procedentes de la poligonal cerrada por el método MNEMO, se procedió a hacer lo mismo con las procedentes de la observación del ENC2. Estas solo representaban una poligonal de ida y la visualización inicial en el programa ARIANE constató que dichas coordenadas presentaban unas desviaciones mayores que con el método MNEMO. Por ello, estas coordenadas no fueron introducidas en el procedimiento de cálculo y solo han servido, en líneas generales, para la comprobación de los resultados obtenidos por el resto de los métodos.

Todas las coordenadas obtenidas en el método de cálculo fueron importadas al programa de dibujo asistido por ordenador AUTOCAD y con la ayuda de los croquis de campo se procedió a la edición de cartografía de las poligonales, la entrada a la cavidad y la cámara aérea de la Sala de los Moros.

#### 7.4.3.3. Resultados complementarios obtenidos con ciencias auxiliares

Para completar la prospección arqueológica de la cueva utilizamos una serie de métodos indirectos que, aunque no han sido el objeto principal de este trabajo, sí que han mejorado la contextualización arqueológica de los yacimientos y la seguridad e higiene de los buceadores antes de introducirse en el agua, premiando la salud e integridad de los miembros del equipo de trabajo. En este caso, fueron pocos los análisis y estudios anexos realizados, en ocasiones ya aplicados por otros equipos de investigación. Así, las muestras obtenidas ayudaron de forma notoria al entendimiento global del yacimiento.

##### 7.4.3.3.1. Resultados del estudio del perfil hídrico con sonda CDT

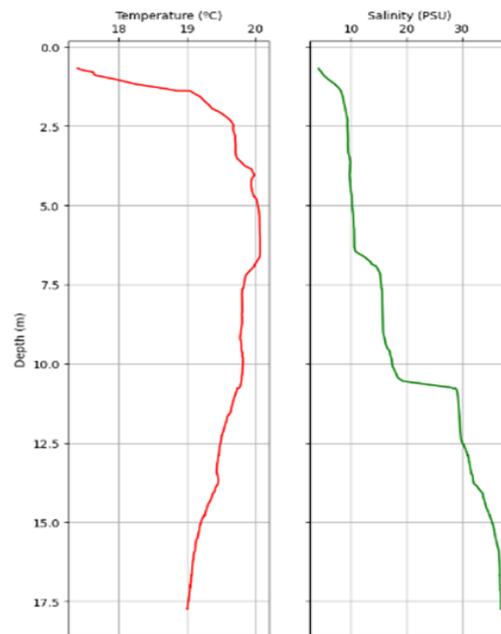
La cavidad del Sistema Sa Gleda-Camps des Pou tiene unas características especiales que la posibilita para ser utilizada como punto de aguada para el abastecimiento tanto para uso humano como para el ganado, debido a la facilidad de acceso a la misma, tanto por su suave pendiente en la entrada principal de la cueva como por los diferentes accesos secundarios (Sala de los Moros y Galería de las Cónicas) que permitían un uso rápido y seguro del agua. En esta ocasión pudimos obtener datos recientes de las características químicas de esta agua, ya que también a principios del año 2020 el equipo de la SEB realizó mediciones con CTD del agua de la cavidad (Gràcia *et al.*, 2020). Los datos de temperatura, salinidad y profundidad se midieron mediante una sonda oceanográfica XR-420 CTD del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados<sup>71</sup> (IMEDEA).

La sonda fue transportada por un espeleo-buceador que avanzó en vertical muy lentamente para poder tener un registro completo y fiable. La temperatura del agua superficial en el lago de la Sala de Entrada el mes de octubre del año 2020 era 17°C. En invierno, en el mes de enero alcanzó los 12°C con una importante

---

<sup>71</sup> <https://imedea.uib-csic.es/>

termoclina<sup>72</sup> a los 2 metros de profundidad que sube la temperatura a 19°C. Los valores térmicos entre los 3 y 4 metros de profundidad suben a 20°C, y se mantienen constantes hasta los -7 metros para luego descender ligeramente hasta los -24 metros con valores de 19°C. La razón de la temperatura tan baja en los primeros metros de la columna hídrica está relacionada con la temperatura exterior, ya que la amplia entrada del derrumbe se ve afectada por las oscilaciones térmicas de la superficie (Gráfico 9).



**Gráfico 9.** Estudio del perfil hidrico de la cavidad realizado con sonda CTD donde se aprecia la variación de temperatura y salinidad respecto a la profundidad. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2020).

La cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou presenta un perfil estratificado en función del gradiente de salinidad, debido a la diferente densidad. Posee 3 capas muy claras y diferenciadas separadas por una picnoclina<sup>73</sup>.

<sup>72</sup> La termoclina es la zona donde la temperatura cambia muy rápidamente con la profundidad y limita la zona de aguas profundas de las superficiales.

<sup>73</sup> Una picnoclina es una capa de agua en la que se evidencia un cambio súbito en su densidad vinculado con la profundidad.

A la hora de interpretar el perfil de salinidad es importante tener presente la considerable distancia que separa la cueva de la costa, que alcanza los 1.7 kilómetros. La salinidad, a principios del otoño de 2020, en el lago de entrada, era inferior al 2 ‰, en el nivel más superficial, para subir hasta el 10 ‰ hasta los 7 metros y 16 ‰ cerca de los 11 metros, y a partir de ahí se incrementa bruscamente al 30 ‰ y luego lentamente hasta aproximadamente 37 ‰ en las cotas más profundas (Gràcia *et al.*, 2020).

De este modo, y aunque algo salobre, el agua del lago de la entrada de la cavidad era potable con un gradiente mínimo de salinidad. La potabilidad del agua podía depender coyunturalmente de factores extrínsecos puntuales como el aumento de fangos y sedimento provocados por la escorrentía de los torrentes que se producen en épocas de alta pluviosidad o por el aumento de heces en el agua en periodos de estío pronunciados cuando los animales, sobre todo palomas y murciélagos, utilizaban esa agua para consumo.

Estos datos obtenidos por la lectura del CTD nos contextualizan histórica y arqueológicamente un poco más la cavidad y su uso como punto de aguada (Marlasca y López, 2014; Martos, 2018)

#### **7.4.4. Resultados metodológicos obtenidos en la cova Genovesa o d'en Bessó**

La singularidad de esta cueva no yace en los restos arqueológicos sumergidos, ya que estos están completamente expoliados, sino en sus estructuras arquitectónicas ciclópeas y sus importantes restos paleontológicos, ambos sumergidos bajo sus aguas.

Los trabajos prospectivos y de documentación arqueológica y paleontológica en la cova Genovesa fueron realizados durante las campañas de los años 2018 y 2020. En la primera, los trabajos efectuados consistieron básicamente en la toma de una serie de capturas fotográficas para comprobar el estado general de la cavidad y para realizar labores de observación y documentación de posibles remanentes arqueológicos, paleontológicos y arquitectónicos en su interior.

Así, en la campaña del año 2018, se realizó una primera fotogrametría básica del muro sumergido en el lago de la Sala de Entrada a la cavidad, la cual nos permitió observar el grado de conservación de este muro ciclópeo sumergido y la gran dificultad que tuvo que suponer para los antiguos pobladores la construcción de esta estructura de alineación de rocas, sin luz natural ni herramientas modernas para su colocación, siendo únicamente factible su realización si el nivel freático del agua estaba en un nivel inferior al actual (Aramburu-Zabala, 2018b) (Fig. 93).



**Figura 93.** Modelo fotogramétrico de la pasarela sumergida realizado por Manuel Fumás y procesado por José Moya de la Universidad de Alicante (UA).

La segunda campaña de prospección, llevada a cabo en el año 2020, tenía objetivos diversos puesto que iban desde intentar mejorar el modelo fotogramétrico del muro ciclópeo sumergido hasta conseguir la posición exacta de los restos paleontológicos remanentes en el interior de las galerías sumergidas. La finalidad era aumentar la precisión de la prospección arqueológica para generar nuevas hipótesis históricas, a la vez que se intentaba mejorar la metodología de trabajo.

Concretamente, en la parte sumergida que comunica la Sala de la Entrada con la Sala de las Rates-Pinyades, el objetivo era intentar conseguir un modelo 3D que permitiera escalar y georreferenciar el muro ciclópeo. De esta forma, se podría utilizar posteriormente este modelo en el estudio de sus características arqueológicas, morfológicas y arquitectónicas, obteniendo, de este modo, más información sobre este tipo de estructuras murarías ciclópeas y sobre su posible

uso en la antigüedad mallorquina para generar hipótesis sobre el porqué de su construcción (Fig. 93).

Por otro lado, para mejorar la prospección visual arqueológica de la cavidad, debíamos apoyarnos, una vez más, en el mapeo por hilo con el MNEMO (Kister, 2017). En esta ocasión, nuestro segmento de medición debía discurrir desde el lago de la Sala de Entrada hasta la Galería dels Myotragus, ubicación donde hace años se habían encontrado gran cantidad de restos paleontológicos de este animal extinto. Una vez actualizada la topografía de la cueva, hasta esta galería, debíamos comenzar la prospección visual en busca de posibles restos paleontológicos conservados en la cavidad (Fig. 51). Posteriormente, y si la prospección era fructífera, se debía colocar el dispositivo de radiolocalización MICROSUMMER cerca de donde se ubicaba el remanente de huesos de *Myotragus balearicus* (Bover y Ramis, 2005) y, de esta manera conseguir ubicar la coordenada exacta, tanto en el interior de las galería sumergida como respecto a la superficie, con la intención final de intentar extraer la máxima información al respecto y conseguir la geo posición del yacimiento paleontológico. Para ello, el primer paso a conseguir era la obtención de la coordenada del primer punto del MNEMO en el hilo guía sumergido, como única garantía de tener una lectura o track de mapeo correcto desde el punto de inicio hasta nuestro punto de destino (Fig. 94).



**Figura 94.** Descenso por la entrada empedrada de la cova Genovesa de todo el material técnico necesario para la prospección y del emisor de radiolocalización MICROSUMMER. (Foto; Autor).

Los primeros puntos georreferenciados se tomaron en la parte interior de la cavidad, desde la entrada hasta el nivel del agua del lago en la Sala Principal. Para ello fue necesario utilizar una estación total electrónica con mira laser, la cual podía calcular los tres ejes y sus errores asociados: el de verticalidad, que con la doble compensación veía reducida su influencia sobre las lecturas horizontales, y los de colimación<sup>74</sup> e inclinación del eje secundario, con el mismo comportamiento que en un teodolito clásico, salvo que en el primero pueden hacerse correcciones por software, mientras que en el segundo la corrección debe realizarse por métodos mecánicos (Fig. 95.1). El instrumento realizó la medición de ángulos a partir de marcas realizadas en discos transparentes. Las lecturas de distancia se realizaron mediante una onda electromagnética portadora, en nuestro caso mediante infrarrojos, que rebotaban en un prisma ubicado en el punto a medir y regresaban. El dispositivo tomaba el desfase entre las ondas, lo que hacía necesario que existiera una línea visual entre la estación total y el prisma o punto de control. La gran ventaja que mantiene la estación total ante los nuevos sistemas satelitales es la posibilidad de realizar trabajos bajo techo y subterráneos.

Una vez realizada la medición, hasta el nivel freático de la cueva, se tomó otra medida más colocando el bastón con el prisma dentro del agua, junto al primer punto de la línea guía sumergida, dejando el prisma en el exterior. Una vez terminadas las mediciones bajo el techo rocoso comenzaron la toma de datos en superficie terrestres comenzando en la entrada a la cavidad y llegando hasta la calle Leonardo da Vinci, en la urbanización de Cala Anguila (Figs. 95.2 y 95.3).

Tras las labores de topografía clásica comenzaron, en la Sala de Entrada de la cavidad, los trabajos de fotogrametría del muro ciclópeo sumergido. Y, por último, comenzó la inmersión principal con el objetivo de introducir el emisor MICROSUMMER de radiolocalización en la Galería dels Myotragus para georreferenciar los restos paleontológicos respecto al plano topográfico, respecto a la lectura del mapeo por hilo y respecto al plano geográfico terrestre (Fig. 95.4).

---

<sup>74</sup> La colimación sirve para controlar los movimientos producidos a partir de una recta entre un punto fijo y la estación topográfica.

#### 7.4.4.1. Resultados topográficos

Aunque en los trabajos previstos contemplaban la necesidad de realizar un mapeo por hilo con el MNEMO desde la Sala de Entrada hasta la Galería dels Myotragus, para conocer la geo posición exacta de la galería con restos óseos de *Myotragus balearicus* (Guerrero, 1996; Gràcia *et al.*, 2003; Bover y Ramis, 2005; Palombo *et al.*, 2006), éstos finalmente no fueron necesarios al conseguir toda la nueva topografía de la cueva por parte del espeleo-buceador Alvaro Granell, responsable del proyecto de topografía denominado “Proyecto Genovesa” el cual tenía todos los archivos del ARIANE actualizados y las líneas del MNEMO corregidas.

De este modo, ahora nuestro objetivo era cotejar esos datos de Granell con los obtenidos por la radiolocalización, en lo que a la coordenada final de la Galería dels Myotragus se refería. Para ello se colocó el emisor en la intersección entre la Galería dels Myotragus, la Sala Esfondrada y la Galería dels Poliquets (Fig. 95.4). Es en ese momento cuando se redescubrió, por parte de Francesc Gràcia, una pequeña sala sumergida con gran cantidad de restos óseos de *Myotragus balearicus* en su interior, siendo éste un descubrimiento extraordinario, puesto que desde hace años se creían expoliados todos los restos paleontológicos de esta especie en la cavidad.

Por otra parte, el equipo de superficie comenzó las tareas de búsqueda de la señal del emisor MICROSUMMER colocado en el interior de la Galería dels Myotragus. Aunque lamentablemente, y tras horas de búsqueda intensiva, se decidió abortar la tarea de rastreo debido a la inexistencia de señal recibida en el receptor WINTER. Nuestras previsiones nos indicaban una zona concreta de búsqueda que, según la orografía, fue calculada midiendo las distancias sobre plano geográfico de las líneas del MNEMO obtenidas en los trabajos del Proyecto Genovesa, tomando como punto de referencia de inicio de esa lectura su línea de mapeo por hilo, punto coincidente con la entrada de la boca de la cueva, creyendo que ellos habían realizado una estimación correcta.

La señal, según los cálculos del equipo, debía escucharse en un descampado ubicado entre varias casas del Paseo de Velázquez de la urbanización de Cala

Anguila, en las coordenadas UTM 31N, X: 527194.8, Y: 4375182, pero esto no fue así (Figs. 95.5 y 95.6).



**Figura 95.** Imágenes de los distintos trabajos realizados en la cova Genovesa o d'en Bessó. **1.** El topógrafo Pablo Cantuel tomando puntos del inicio de la línea guía sumergida desde la entrada empedrada de la cova Genovesa con la estación total. (Foto; Autor). **2.** El técnico Juan Leandro ayudando en las labores de topografía, en este caso sosteniendo el prisma en el cual el láser infrarrojo de la estación total toma la medición exacta. (Foto; Autor). **3.** Las labores de topografía en superficie continuaron por la noche debido a la gran cantidad de puntos necesarios para el cálculo de la poligonal. (Foto; Autor). **4.** Imagen de los espeleo-buceadores Javier Lario (izquierda) y Francesc Gràcia (derecha) colocando el emisor de radiolocalización MICROSUMMER en la Galería dels Myotragus en la cova Genovesa en la campaña del año 2020. (Foto; John Kendall). **5.** El técnico electrónico Juan Leandro (izquierda) y el arqueólogo Antonio J. Talavera (derecha) realizando los últimos cálculos para intentar encontrar la señal del emisor de radiolocalización MICROSUMMER. (Foto; Autor). **6.** El técnico Juan Leandro buscando la señal del emisor entre las casas de la urbanización de la calle Diego Velázquez en Cala Anguila. (Foto; Autor).

#### 7.4.4.1.1. *El sistema de mapeo por hilo MNEMO*

Los trabajos de mapeo por hilo programados para la campaña 2020 estaban definidos de un modo muy concreto y escueto a causa del poco tiempo y medios económicos con los que contaba el proyecto para el estudio de esta última cueva. Afortunadamente, tras conversaciones con otro equipo de investigación en la cova

Genovesa supimos que su director Alvaro Granell estaba realizando un reequipamiento de las líneas de hilo en el interior de las galerías y que además utilizaba el dispositivo MNEMO para registrar y documentar el lugar donde realizaba sus trabajos. Para nosotros esta fue una gran noticia puesto que en principio solo íbamos a mapear desde la Sala de Entrada hasta la Galería dels Myotragus, pero con las líneas de mapeo de Granell teníamos una parte del trabajo hecho y una orientación sobre como enfocar nuestros objetivos (Fig. 96).



**Figura 96.** Sobreexposición de la lectura de línea del MNEMO (línea roja) tomada por el equipo del Proyecto Genovesa sobre la topografía manual realizada por el SEB en el programa ARIANE. En ella podemos ver como el porcentaje de error es mínimo, sobre todo en las primeras galerías de la cueva (Autor; Álvaro Granell).

En principio, las líneas del mapeo por hilo realizadas con el MNEMO del equipo del Proyecto Genovesa parecían totalmente coincidentes con la realidad plasmada en el esquema topográfico de la SEB, sin embargo, el punto de partida del MNEMO no disponía de unas coordenadas precisas, a causa de la dificultad en la obtención de un GPS profesional que calculase la coordenada real del punto de partida en la lectura del hilo guía. De este modo, calculando con el programa ARIANE las coordenadas de referencia que había tomado Granell en su estudio vimos que su punto de inicio estimado de la lectura con el MNEMO correspondía

a las coordenadas UTM 31N, X: 527087.8, Y: 4375199.6, por lo que las coordenadas respecto a la intersección donde se había puesto el emisor MICROSUMMER (intersección entre la Galería dels Myotragus, la Galería dels Poliquets y la Sala Bermudacaris) correspondían a las coordenadas UTM 31N, X: 527194.8, Y: 4375179.8 y éstas eran las coordenadas que nosotros habíamos tomado como referencia para intentar localizar en superficie la señal del MICROSUMMER. Así pues, el hecho de no localizar ningún tipo de señal en superficie por parte del técnico en radiolocalización Juan Leandro, con el receptor WINTER, nos hacía intuir que las coordenadas de inicio de la línea de Granell podían ser erróneas. Este error en la coordenada de inicio del MNEMO de Granell inutilizó el modelo de lectura (Fig. 97).



**Figura 97.** Línea de lectura del MNEMO de Álvaro Granell (línea roja) sobre ortofotomapa, donde se puede observar el descampado entre las edificaciones donde se buscó la señal del emisor, justo en la intersección entre las líneas norte y sur. Fuente; elaboración propia.

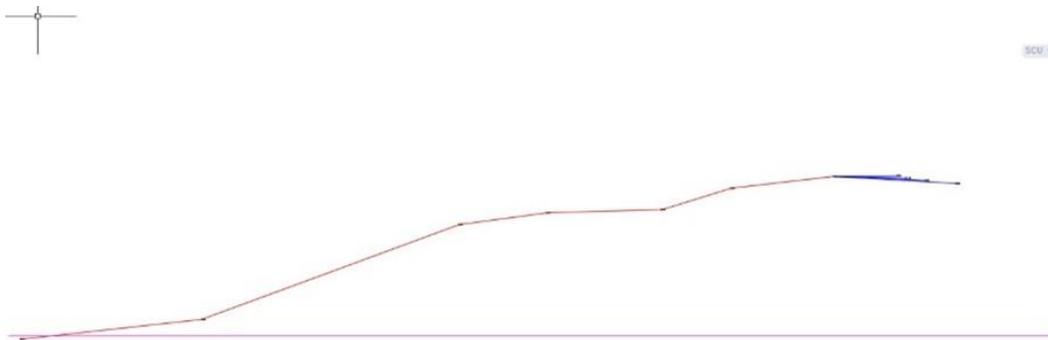
#### 7.4.4.1.2. La obtención de la coordenada real de inicio de la línea del MNEMO

En la obtención de la coordenada de inicio en la cova Genovesa entró de nuevo en juego el topógrafo Pablo Cantuel, consiguiendo una selección correcta de puntos gracias a la utilización de la estación total y a la toma de coordenadas con el GPS diferencial. La tabla siguiente nos muestra las coordenadas de esos puntos (Tabla 12).

RESULTADOS CÁLCULO DE COORDENADAS RED GENOVESA							
COORDENADAS BASES ERTS 89, UTM 31				PRECISIONES			DESCRIPCIÓN
ID. PUNTO	X(m)	Y(m)	H(m)	px(m)	py(m)	pH(m)	
1000	527068,053	4375144,593	-0,393	0,052	0,056	0,022	Inicio Nenmo
1001	527064,787	4375167,431	2,091	0,051	0,054	0,038	Poligonal cueva
1002	527091,228	4375199,94	14,215	0,026	0,029	0,018	Poligonal cueva
1003	527093,148	4375211,058	15,659	0,018	0,019	0,016	Poligonal exterior
1004	527083,291	4375225,563	16,088	0,011	0,012	0,012	Poligonal exterior
1005	527086,791	4375234,273	18,845	0,007	0,009	0,010	Poligonal exterior
1006	527089,042	4375247,271	20,311	0,004	0,005	0,006	Vértice observado con GPS
1007	527083,496	4375255,341	20,415	0,006	0,006	0,010	Vértice observado con GPS
1008	527091,245	4375256,513	20,127	0,007	0,002	0,011	Vértice observado con GPS
1009	527101,609	4375258,861	19,832	0,005	0,007	0,005	Vértice observado con GPS
1010	527114,031	4375262,796	19,436	0,002	0,005	0,004	Vértice observado con GPS

**Tabla 12.** Resultados del cálculo de coordenadas en superficie obtenidas por el topógrafo Pablo Cantuel. En verde aparece la coordenada final de la poligonal y punto 0 de partida del hilo guía sumergido (Autor; Pablo Cantuel).

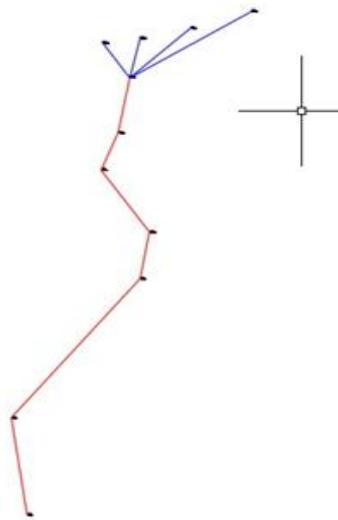
En las figuras siguientes podemos observar en color azul los cinco vértices observados con GPS y los seis puntos de referencia para el estudio de la poligonal interior y exterior obtenidos mediante estación total. El último punto es coincidente con el inicio de la lectura del MNEMO y para conseguirlo fue necesario que un buzo entrara dentro del agua y sostuviera el prisma en la misma ubicación desde donde partía el hilo guía hacia el interior de la cavidad sumergida (Fig. 98).



**Figura 98.** Línea altimétrica tomada por la estación total desde la calle Leonardo da Vinci (líneas azules correspondientes a los cinco vértices observados con GPS con una altitud media de 20 metros sobre el nivel del mar) hasta el inicio de la línea sumergida (punto que aparece por debajo

de la línea violeta que señala el nivel del mar) con una altitud negativa de -0.393 metros bajo el nivel del mar. Este punto final fue el inicial del MNEMO. (Autor; Pablo Cantuel).

En la figura anterior (Fig. 98), observamos una línea de color violeta que nos indica el nivel del mar, coincidente con el nivel freático, y por debajo de ella, en el último punto de la poligonal, aparece el punto que corresponde al anclaje sumergido que inicia la lectura de la línea de MNEMO obtenida por el equipo del Proyecto Genovesa (Fig. 99).



**Figura 99.** Imagen de los distintos puntos tomados por GPS diferencial (color azul) hasta llegar al último punto correspondiente al punto sumergido que inicia la lectura de línea del MNEMO. (Autor; Pablo Cantuel).

#### 7.4.4.1.3. La problemática en la recepción del emisor SUMMER

Al recalcular el modelo con el ARIANE de las líneas obtenidas por el equipo del Proyecto Genovesa, y facilitadas por su director Álvaro Granell, con la nueva coordenada de inicio obtenida por el topógrafo observamos que todo el modelo se desplazaba 59.20 metros hacia el sur. Esta diferencia tan notoria se debe al desplazamiento hacia el sur del punto de inicio, lo cual provocó que todo el modelo se trasladase a esa nueva ubicación y nos permitiera entender por qué no

fuimos capaces de encontrar la señal emitida por el emisor de radiolocalización MICROSUMMER en la zona del descampado donde la buscábamos (Fig. 100).



**Figura 100.** El error en la coordenada de inicio nos desplazó todo el modelo topográfico obtenido en las lecturas del MNEMO (línea roja) casi 60 metros al sur (línea amarilla) lo que nos permitió entender la importancia de una geo posición correcta del punto de partida de la lectura. Fuente; elaboración propia.

Gracias a sobreponer las líneas de MNEMO sobre ortofotomapa en el ARIANE nos dimos cuenta de que buscábamos la señal del emisor en un lugar erróneo y que posiblemente tampoco hubiéramos podido localizarlo exactamente en superficie al encontrarse la vertical de la señal en una propiedad privada de la urbanización de Cala Anguila, en la calle Diego Velázquez. Además, también entendimos el porqué del alto grado de contaminación de la cavidad. Esta es debido a que la Sala del Pou Negre tiene en la superficie terrestre un gran depósito de una antigua depuradora de la urbanización que, probablemente, estaba mal impermeabilizada, lo cual provocó la contaminación de los niveles freáticos existentes bajo la superficie donde se encuentra ubicada (Fig. 101).



**Figura 101.** Imagen del software ARIANE donde aparece la línea de MNEMO correcta (línea roja), con el punto de inicio de lectura del hilo sumergido (estrella amarilla) calculado topográficamente con tolerancia topográfica centimétrica. Fuente; elaboración propia.

#### 7.4.4.1.4. El sistema de mapeo ENC2 de SEACRAFT

Al igual que el sistema de mapeo por hilo del MNEMO, el ENC2 de SEACRAFT también utiliza el software ARIANE para introducir los datos observados, visualizar los resultados y exportar sus observaciones crudas de campo ( $Dg$ ,  $\Delta Z$ ,  $AZ_{\text{magnético}}$ ). Con estos datos se generó una rutina de cálculo y se obtuvieron las coordenadas georreferenciadas de cada uno de sus vértices. Las medidas registradas en el interior de la cavidad por este sistema debían tener siempre un punto de referencia o una coordenada concreta en el exterior, en nuestro caso la coordenada obtenida topográficamente en la entrada UTM 31N, X: 527068.053, Y: 4375144.593, H: -0.393.

En esta ocasión también, el método de observación de campo del ENC2 fue sin duda la metodología, que permitió la prospección y la topografía de la cueva de la forma más rápida puesto que su montaje sobre un propulsor mecánico o escúter minimizó el tiempo de inmersión y aumentó las distancias capaces de ser medidas. Pese a ello, no fue el método más riguroso pues observó el acimut con respecto al Norte magnético con una precisión de  $5^\circ$  sexagesimales, la

distancia geométrica con una precisión del 2% de la distancia medida y la profundidad con una precisión de 0.3m.

En el caso del estudio de la cova Genovesa la observación de campo comprendió en su realización la obtención de la ruta sobre o junto al hilo guía que estimaba la poligonal desde el punto 6 del MNEMO, debido a problemas importantes de visibilidad en el agua en la entrada de la cavidad, hasta la intersección entre la Galería dels Myotragus y la Galería dels Poliquets y Sala Esfondrada (Fig. 102).



**Figura 102.** Imagen del ARIANE donde se muestra como la lectura del ENC2 (línea azul) fue completamente coincidente con el estudio de lectura de hilo llevado a cabo con el MNEMO de Granell (línea roja), por lo que este tercer método de mapeo nos garantizó con la máxima seguridad que nuestra lectura era correcta. Fuente; elaboración propia.

La finalidad de utilizar este método fue la de obtener unos resultados adicionales, analizar su fiabilidad de campo y comparar los datos con los obtenidos por el método MNEMO. Con ello se pretendía conseguir una nueva comprobación de la poligonal observada. Se ha destacar la posibilidad que incluye esta instrumentación de poder volver a recorrer una ruta previamente preestablecida gracias al sistema de guiado que integra el sistema ENC2, es decir, el sistema permite poder replantar puntos, lo que sin duda es de gran ayuda en la previsión de campañas futuras y en la mejora de posibles protocolos de emergencia.

#### 7.4.4.2. Resultados arqueológicos y paleontológicos de la prospección visual

La campaña de prospección del año 2020 consiguió localizar y geo posicionar importantes restos paleontológicos en una pequeña sala sumergida colindante a la Galería dels Myotragus (Fig. 104). Debemos recordar que Gràcia (2003) ya mencionaba en su estudio el hallazgo de una gran cantidad de restos óseos en una pequeña cámara paralela a la Galería dels Myotragus: *Los primeros ejemplares que se han localizado se encuentran en la Galería dels Myotragus, entre 60 y 70 m de iniciado el buceo (entre 162 y 172 m en el interior de la cavidad si se contabiliza la parte actualmente terrestre). La mayor densidad se encuentra entre los 100 y 145 m de galería subacuática (202 y 247 m totales), principalmente en el interior de una cámara de disolución de poca altura, situada en un lateral de la Galería dels Myotragus* (Gràcia et al., 2003).

Tras realizar los procedimientos correspondientes, y con el asesoramiento del IMEDEA, el equipo de Francesc Gràcia, en el año 2003, extrajo un total de 170 huesos, de los miles que todavía quedaban dentro de la cavidad (mínimo de 35 a 40 individuos) (Gràcia et al., 2003) (Fig. 103).



**Figura 103.** Vista general de la salita en el año 2002. Se trata de un cuarto de disolución (cámara freática) de poca altura, situada en un lateral de la Galería dels Myotragus (a unos 200 metros de la sala de Entrada). La disposición de los ejemplares indica que murieron in situ y no por una corriente de agua que transportara los huesos hacía el interior de la cámara. Se han contabilizado en superficie un mínimo de 12 ejemplares de *Myotragus balearicus*. La profundidad bajo las aguas es de 10,5 metros. Fuente; (Gràcia et al., 2003).



**Figura 104.** Vista general de la salita en el año 2020 donde se puede observar el gran remanente de huesos de *Myotragus balearicus* todavía depositados en la cámara inundada paralela a la Galería dels Myotragus. El hecho de estar en un lugar de extrema dificultad en su acceso ha evitado el expolio de los huesos. (Foto; Miguel Ángel Perelló).

La cantidad de restos óseos encontrados en superficie, sin enterrar, en la pequeña cámara lateral de la Galería dels Myotragus resultaba muy importante, siendo sólo comparable en cuanto a la espectacularidad de los materiales de la galería 4 de la cova Estreta en Pollença (Encinas, 1997) (Fig. 105.1). Posiblemente, la cova Genovesa es uno de los yacimientos más importantes en cuanto al número de ejemplares, si se compara con el resto de los yacimientos en los que se han encontrado más huesos en la isla de Mallorca como son; la cova de Muleta en Soller (De Mulder, 2020), la cova des Moro en Manacor (Trias, 2000), el Bufador de Son Berenguer en Santa Maria (Cuerda, 1966) o con los yacimientos de Menorca como la cova C-2 en Ciutadella (Seguí *et al.*, 1998).

Y, por último, mientras los espeleo-buceadores estaban prospeccionando en el interior de las galerías de la cavidad y colocando el emisor, se realizó a la vez una prospección visual en la Sala de la Entrada y en el lago buscando algún remanente cerámico alrededor del muro ciclópeo sumergido, en las pendientes sumergidas de la Galeria de los Gal·lesos y, en superficie, en la zona de acceso a la Sala de la Entrada y en la Sala de les Rates Pinyades (Fig. 51). Desafortunadamente, en ninguna de ellas se encontró el más mínimo remanente cerámico, aunque si paleontológico en la Sala de les Rates Pinyades. Concretamente se encontraron los huesos de un ovicaprino adulto, los cuales, según las observaciones tafonómicas

preliminares por parte de la zooarqueóloga Alba Ruiz Cros, nunca habían estado en exposición subárea. Esto significaba, que este individuo se depositó rápidamente en la cavidad desde el momento de su muerte (González, 2002) (Fig. 105.2).

#### 7.4.4.3. Resultados del proceso fotogramétrico y de documentación

La recopilación fotográfica del muro sumergido de la cova Genovesa era necesaria para los estudios tipológicos posteriores, para la creación de una base de datos y para la realización de modelos digitales 3D. Para que el software utilizado, en nuestro caso el Agisoft Metashape Professional, pudiera identificar la ubicación de cada una de las imágenes, era necesario seguir un orden al tomar las fotos. Se debía comenzar con la captura cenital y luego continuar con la captura de un contrapicado, con un ángulo de inclinación de aproximadamente 45°. Finalmente, debíamos capturar planos perpendiculares y concéntricos de toda la superficie del objeto, siempre considerando las características de cada objeto específico que pretendamos registrar en el modelado digital 3D<sup>75</sup>.

Conocidos los estudios previos sobre el muro sumergido debíamos plantearnos nuevas opciones para mejorar y complementar el conocimiento de esta construcción ciclópea, siendo sin duda la fotogrametría la técnica más rápida, eficaz y rigurosa para documentar y preservar para un futuro esta extraordinaria arquitectura sumergida (Domínguez, Fernández Matallana y Casaban Banaclocha, 2013; Aguilar, Granado y Barrera, 2015; Mayoral, 2017; Moya y Muñoz, 2017; Gijón-Yescas *et al.*, 2021). Además, para poder cotejar su estructura y su paralelismo con otras construcciones era necesario crear un modelo 3D para extraer la máxima información que, posteriormente, pudieran darnos expertos externos, lo cual nos aportará más conocimiento al respecto (Nocerino *et al.*, 2019) (Fig. 105.3).

---

<sup>75</sup> El modelado 3D consiste en utilizar software para crear una representación matemática de un objeto o forma tridimensional. El objeto creado se denomina modelo 3D y se utiliza en distintos estudios y trabajos.

Técnicamente, hasta la fecha, este tipo de documentación gráfica se realizaba a través de fotografía o de fotomosaico pero actualmente la fotogrametría es sin duda la forma más eficaz de poder extraer la máxima información de un objeto sumergido, siempre y cuando las condiciones de visibilidad lo permitan (García, 2014). En nuestro caso, la fotogrametría realizada por John Kendall nos permitió tanto un ahorro considerable de tiempo en la medición y documentación del muro, como la mejora del estudio de la técnica de construcción utilizada mediante el modelo 3D.



**Figura 105.** Tareas de prospección en la cova Genovesa; **1.** Imagen que muestra la extrema dificultad para conseguir fotos o vídeos nítidos si intentamos añadir una escala cerca de los huesos, debido a que el sedimento en suspensión provoca la desaparición de cualquier objeto en segundos. (Foto; Miguel Á. Perelló). **2.** Restos óseos de ovicaprino en la Sala de les Rates Pinyades, sala contigua al muro ciclópeo sumergido en el lago. (Foto; Autor). **3.** Imagen donde se muestra el muro sumergido que conecta las dos partes de suelo emergido que limitan el lago de la cueva. Actualmente se encuentra aproximadamente a -1 metro bajo las aguas. Sin embargo, en los bloques y en las paredes se puede observar, una marca horizontal blanca, posiblemente un paleo nivel freático que nos indica que este paso se encontraba emergido en algún momento del pasado. Los estudios del nivel marino al Holoceno nos señalan un pequeño descenso del mar en la época de las navetas. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003). **4.** Imagen donde aparece John Kendall fotografiando el perímetro del muro sumergido donde no debían ser utilizados elementos de flotación ni botellas a causa de la gran facilidad de enturbiamiento del agua por el sedimento en suspensión. (Foto; Autor).

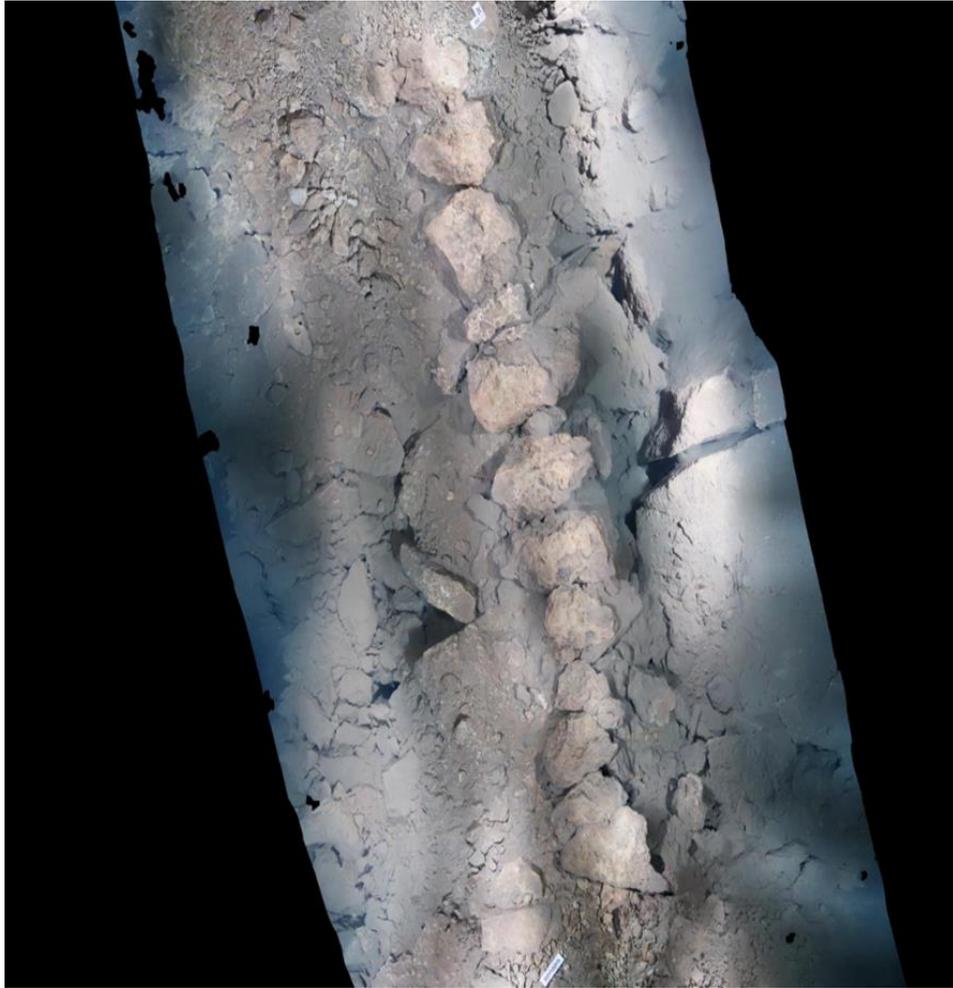
Debido a las limitaciones y consideraciones de no solo obtener datos fotográficos en el entorno de una cueva, sino también del tamaño físico de los espacios que un espeleo-buceador tiene que atravesar, no fue posible capturar tomas oblicuas completas de 45° ni un enfoque de “cabeza abajo”, las cuales se utilizan para obtener los bordes de cada imagen y los ángulos necesarios requeridos para la reconstrucción fotogramétrica. A causa de las limitaciones inherentes de intentar capturar imágenes nítidas bajo el agua, la fotogrametría se realizó utilizando una cámara réflex digital Canon 77D, en una carcasa Easydive, que se había actualizado con firmware personalizado para permitir la toma de fotos a intervalos consistentes. La cámara se configuró para tomar imágenes de alta calidad de 24 megapíxeles con formato jpg, con una velocidad de obturación, apertura y distancia focal establecidas. La distancia entre la cámara y las superficies del objeto nunca fue superior a 1 metro, siendo habitual la captura a 40 centímetros de distancia. La claridad del agua y el gran espacio alrededor del muro en la cueva evitaron que fuera necesario alejarse más (Fig. 105.4)

La elección del objetivo fue un equivalente de fotograma completo de 16 milímetros con distorsión de ojo de pez. Si bien, en muchas situaciones, esto podía generar problemas con la fotogrametría bajo el agua, en nuestro caso permitió al fotógrafo acercarse significativamente a los objetos de interés y maximizar la nitidez de las imágenes. Dado que el área a escanear era rectangular, fue posible capturar imágenes en un patrón circular, lo que le dio al software de procesamiento una gran cantidad de cierres circulares para reducir y contrarrestar los errores iterativos<sup>76</sup>.

Tras el renderizado de las fotografías en el software Agisoft Metashape Professional era necesario compartir el modelo 3D para la valoración y difusión del proyecto. Para ello se utilizó de nuevo el programa Dronelab, el cual permitió subir a la nube el modelo 3D y hacerlo público mediante un visor que reconocía su visualización a modo de ortofoto (Fig. 106).

---

<sup>76</sup> Los problemas de iteración son aquellos en lo que hay que “encontrar cuántas veces entra un número adentro de otro”, aunque los contextos en los que se presentan no den cuenta “inmediatamente” de esta relación. Los equipos que usan procesos de desarrollo iterativos crean, prueban y hacen revisiones hasta que se sienten satisfechos con el resultado final.

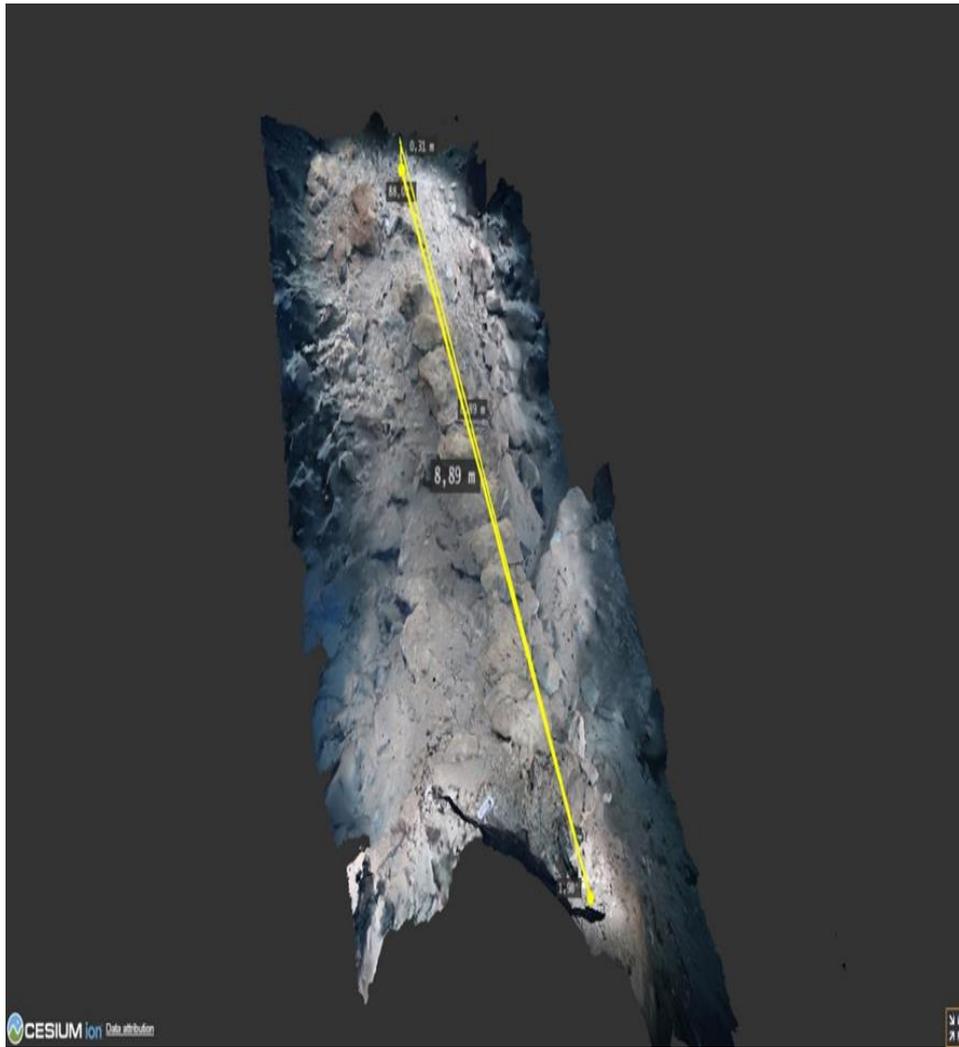


**Figura 106.** Vista en planta del muro sumergido en el lago de la cova Genovesa obtenido a través de fotogrametría y de la visualización por el programa Dronelab. Campaña 2020. (Autor; John Kendall).

Por otra parte, al igual que Dronelab contamos con otra herramienta en línea denominada *Construkt*<sup>77</sup>, en la cual también pudimos subir nuestro modelo 3D a la nube y, desde allí, trabajar con él y compartir nuestros avances e inquietudes al resto de colaboradores, arqueólogos y asesores del proyecto (Fig. 107).

---

<sup>77</sup> <https://konstrukt.com/>

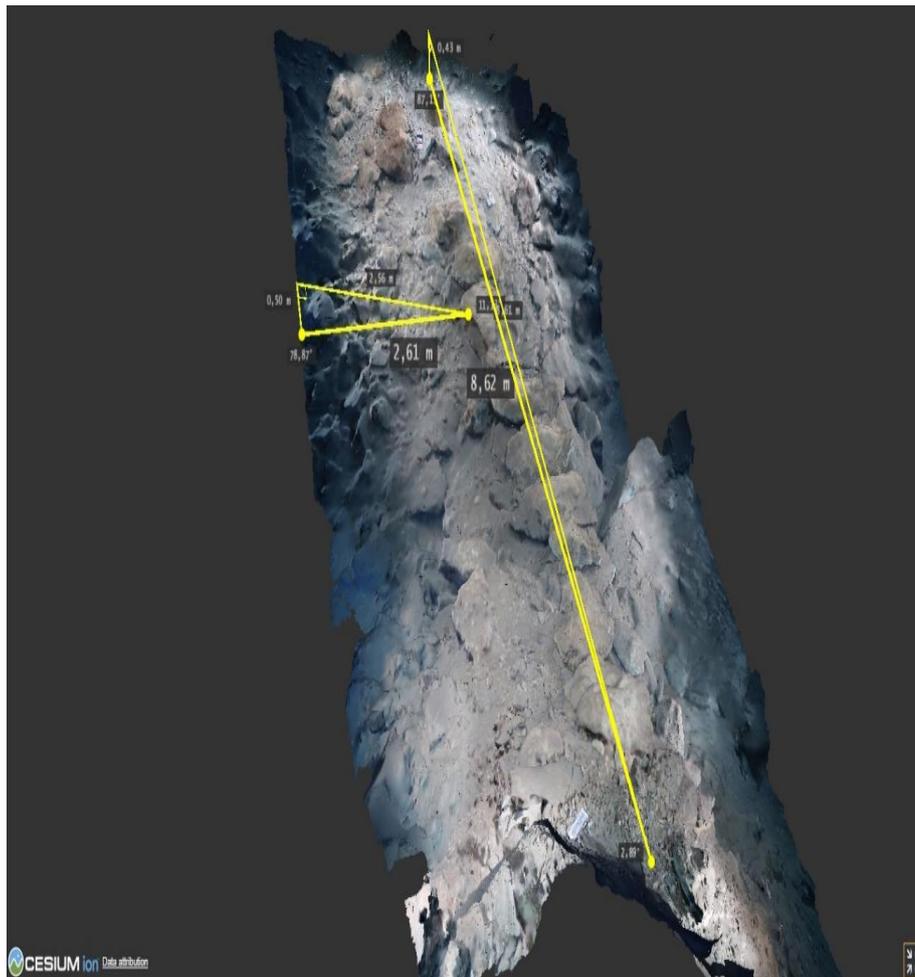


**Figura 107.** La plataforma de visualización en línea Constructed permite tomar medidas de nuestro modelo 3D y compartir los cambios realizados con el objetivo final de crear una simbiosis entre distintos profesionales que puedan colaborar en el conocimiento y desarrollo del modelo, en nuestro caso el muro sumergido de la cova Genovesa. Fuente; elaboración propia.

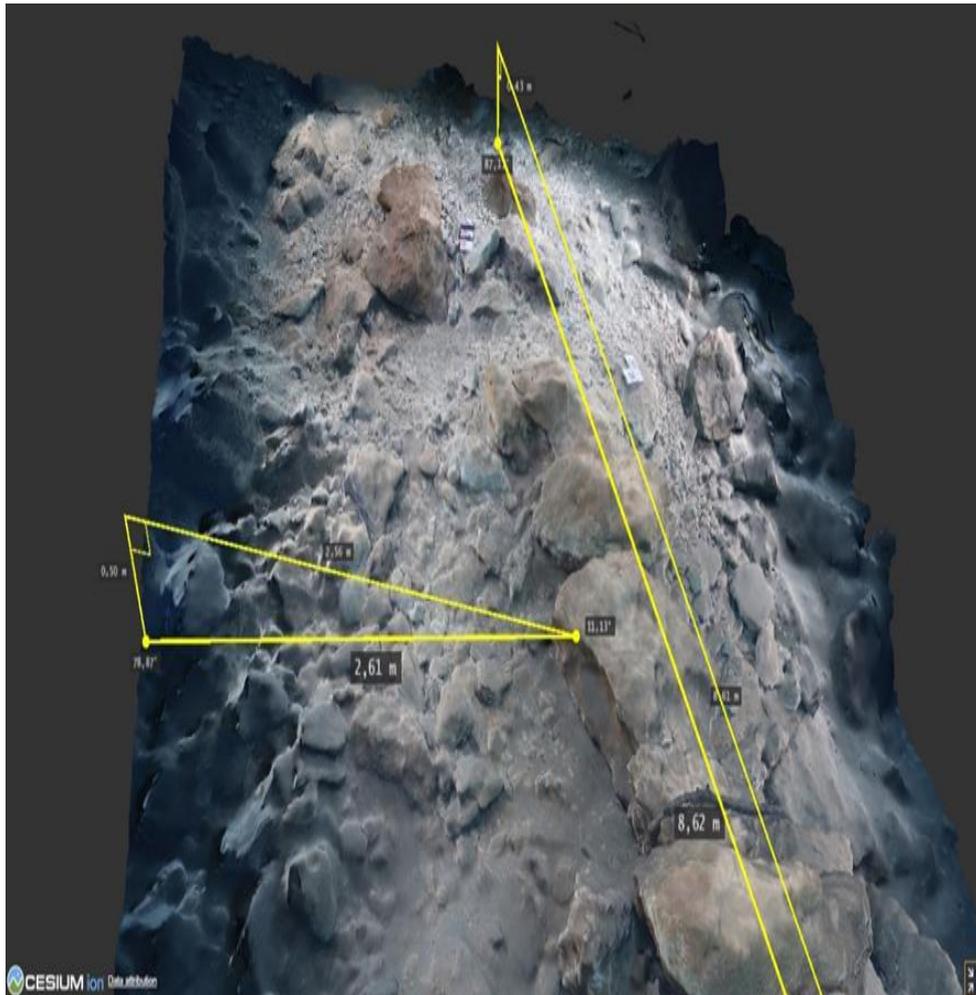
Tras subir nuestro modelo del muro sumergido a la plataforma Constructed pudimos obtener información a partir de sus datos 3D, consiguiendo la geolocalización de cada punto de interés, sus medidas y su orientación. También utilizamos una serie de herramientas disponibles en la misma plataforma como son los procesos de anotar, marcar y colaborar en conversaciones sobre puntos específicos del modelo 3D.

En el artículo publicado por Gràcia (2003) sobre la cova Genovesa señala que; *la longitud del muro es de 7 metros y está prácticamente orientada N-S. En la*

superficie consta de 14 piedras de buen tamaño, así como algunas de más pequeñas. La piedra más grande es de 1,63 metros de largo y 0,6 metros de ancho (Gràcia, 2003). Gracias a la fotogrametría pudimos comprobar que el muro tiene una pequeña inclinación NW-SE y que tiene unas medidas, entre los dos puntos distales, de 8.62 metros y está a una distancia de 2.61 metros de la pared izquierda de la cavidad partiendo en dos el lago interior (Figs. 108 y 109).



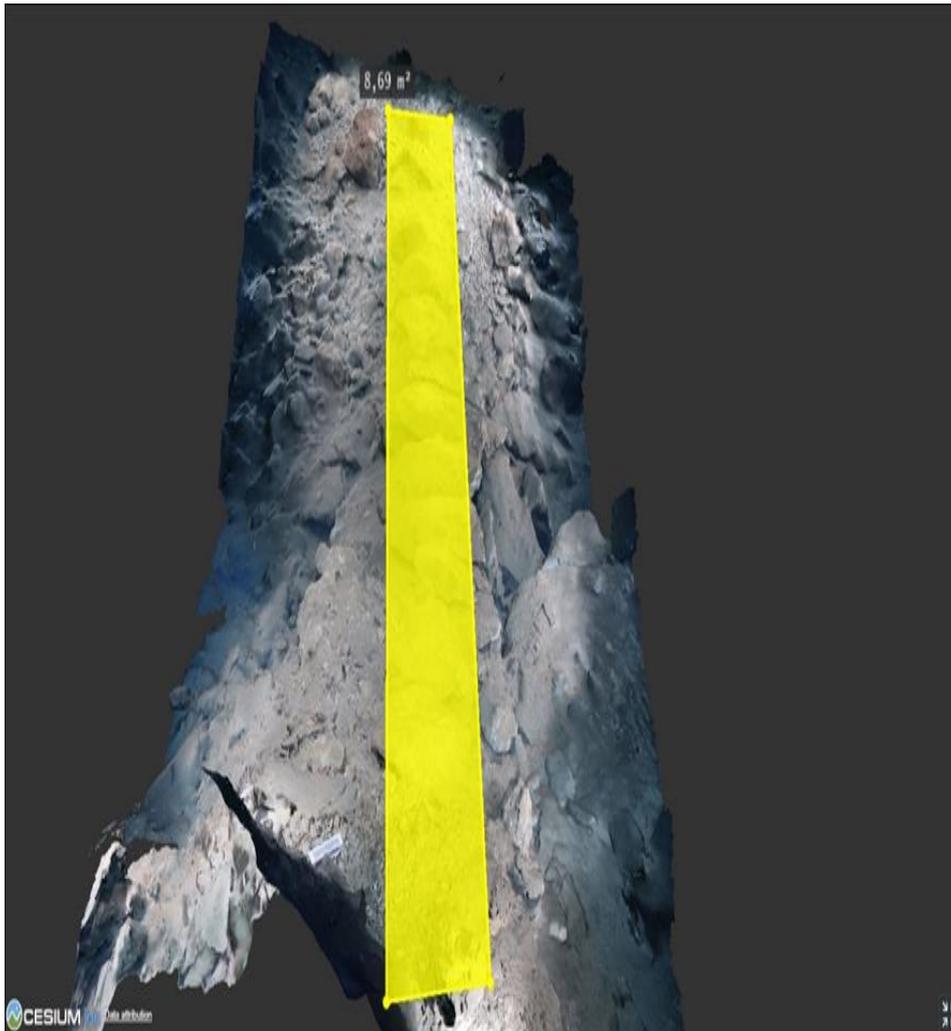
**Figura 108.** Medición de extremo a extremo del muro sumergido que conecta las dos partes terrestres a ambos lados del lago interior. Fuente; elaboración propia.



**Figura 109.** Detalle de las distintas mediciones de longitudes y ángulos que permite el programa Construktred, lo cual permite conocer con exactitud las dimensiones del modelo fotogramétrico. Además, partiendo de tan solo una coordenada se puede conocer la geo posición de cada uno de los puntos a estudio del muro sumergido. Fuente; elaboración propia.

Por último, el sistema de medición del programa Construktred permitió medir distancias y ángulos, lo cual nos sirvió para conocer la columna de agua que existe sobre el muro que es exactamente de 0.90 metros, siendo su superficie total de  $8.69 \text{ m}^2$  (Fig. 110).

De este modo, en la cova Genovesa nos encontramos con tres elementos constructivos con la técnica ciclópea, que son; la rampa, el muro ciclópeo paralelo a la rampa y el muro sumergido en el lago. Todos ellos parecen estar relacionados entre sí, según se desprende de su disposición, a pesar la ausencia de una clara relación física.



**Figura 110.** La zona amarilla nos indica una superficie total de  $8.69 \text{ m}^2$  de extensión del muro sumergido compuesto por 14 rocas de gran tamaño y de varias de un tamaño menor. Fuente; elaboración propia.

#### 7.4.4.4. Resultados de los estudios complementarios

Gracias a las investigaciones, llevadas a cabo durante años por Gràcia y publicadas tanto en su tesis doctoral como en decenas de artículos de investigación (Gràcia, 1998, 2005, 2015a; Gràcia et al., 2001; Gràcia *et al.*, 2007, 2014, 2020; Gràcia, 2011) podemos conocer y contextualizar arqueológicamente

muchos de los yacimientos arqueológicos sumergidos de Mallorca, incluido el yacimiento de la cova Genovesa, actualmente completamente expoliado.

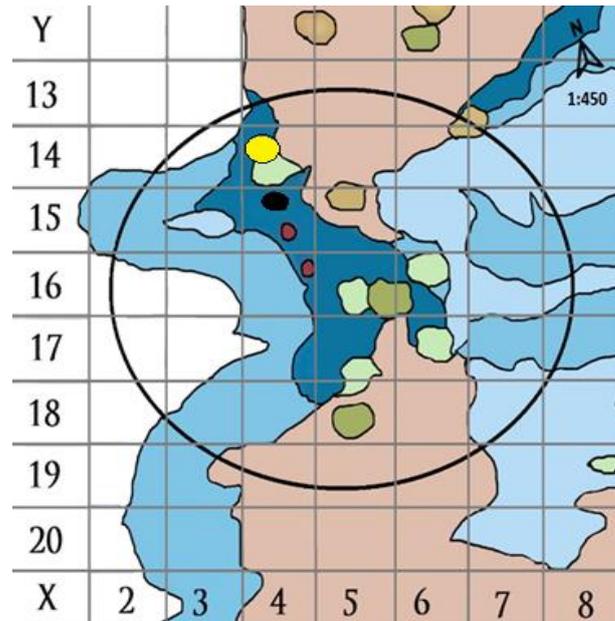
Todos estos trabajos de investigación pretéritos y la excelente bibliografía realizada al respecto han ayudado de un modo exponencial a la resolución de los problemas y a la definición de unos objetivos prospectivos claros (Gràcia *et al.*, 2003, 2011).

#### 7.4.4.4.1 Análisis sedimentológico con sondeos estratigráficos

A modo de contextualización histórica y arqueológica, y como complemento de investigaciones pretéritas, se realizaron una serie de mediciones de la potencia de sedimento sumergido bajo la columna de agua y se extrajo un core estratigráfico.

De este modo, si observamos en detalle la topografía de la Gràcia (2003), concretamente la parte circundante al muro sumergido de la Sala de Entrada, vemos como la zona rosada corresponde a la parte seca que comunica esta sala con la Sala de les Rates Pinyades, los puntos verdes indican los elementos arquitectónicos antrópicos y los puntos amarillos los lugares donde se localizó cerámica pre-talayótica. Así, tomando como referencia esta topografía, se añadieron puntos rojos indicando la ubicación donde se midió la potencia del sedimento sumergido en el lago de la Sala de Entrada y finalmente, con un punto negro, se indicó el lugar del muestreo estratigráfico (Fig. 111).

Para conocer más sobre la potencia del sedimento sumergido, se introdujo una varilla metálica en el limo. Ésta nos señaló la zona más factible de estudio, ya que en todos los intentos la varilla alcanzaba rápidamente la parte inferior del estrato de roca. Tan solo en una ocasión la varilla se introdujo en el sedimento más de un metro, siendo este el punto negro señalado en la topografía (ubicado en el cuadrante X; 4, Y; 15) (Fig. 111).



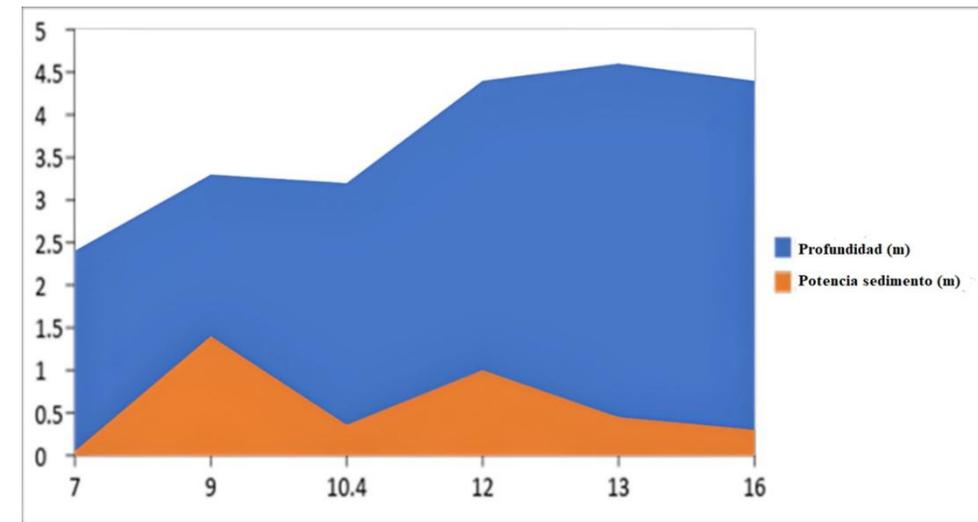
**Figura 111.** Esquema básico orientativo que muestra la ubicación del estudio sedimentológico llevado a cabo en la campaña de viabilidad realizada el año 2018 en ambos lados de la pasarela sumergida de la cova Genovesa. El punto amarillo indica el punto 0, los puntos rojos indican los lugares donde se midió la potencia sedimentaria y el punto negro donde se extrajo el core estratigráfico (X: 4, Y: 15). Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2003).

El objetivo de este estudio pretendía localizar posibles estructuras arquitectónicas soterradas bajo el sedimento, que complementaran a las ya conocidas y, al mismo tiempo, trató de encontrar algún tipo de indicador antrópico que pudiera ayudar a interpretar la estructura ciclópea. Así, mediante medición por eje cartesiano, tomando como referencia la primera roca sumergida del muro (punto 0), y con un total de 6 registros de potencia sedimentológica, fue a 9 metros del punto 0, con rumbo de  $210^{\circ}$  y a 3.3 metros de profundidad cuando se realizó el único sondeo estratigráfico (Tabla 13).

N.º Registro	Acimut	Metros lineales	Profundidad (m)	Potencia sedimento (m)
Punto 0	$210^{\circ}$	0	0	0.01
Registro 1	$210^{\circ}$	7	2.4	0.05
Registro 2	$210^{\circ}$	9	3.3	1.4
Registro 3	$210^{\circ}$	10.4	3.2	0.36
Registro 4	$210^{\circ}$	12	4.4	1
Registro 5	$210^{\circ}$	13	4.6	0.45
Registro 6	$210^{\circ}$	16	4.4	0.3

**Tabla 13.** Diferentes variables en la medición de la potencia sedimentológica existente bajo el agua del lago. Fuente; elaboración propia.

Gracias a la introducción de la varilla metálica en el subsuelo arcilloso sumergido del lago de la cova Genovesa pudimos observar cómo de 0 a 7 metros casi no había potencia sedimentológica y tampoco de 9 metros a 12 metros. Esto podría señalar la posibilidad de una posible estructura enterrada bajo la capa sedimentaria debajo del agua del lago, aunque no se puede descartar que forme parte de la propia morfología rocosa de la cueva (Gráfico 10).

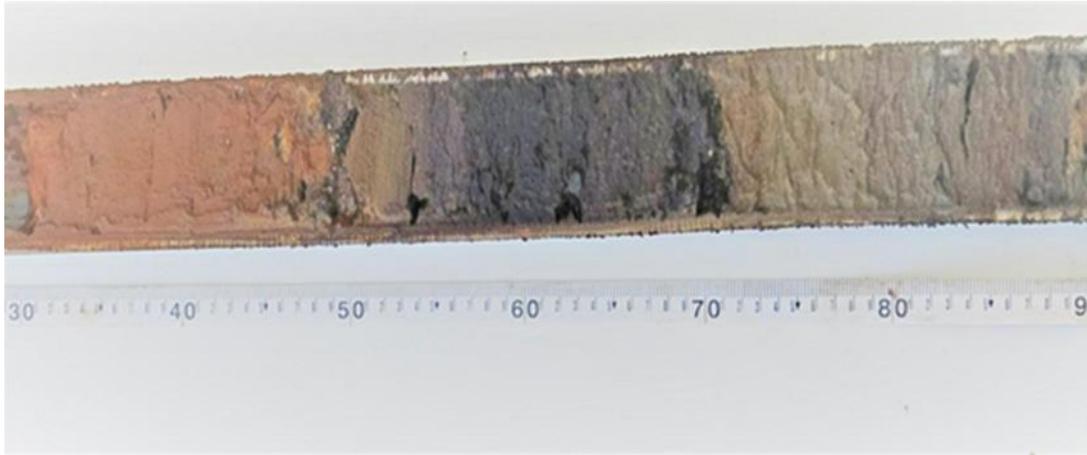


**Gráfico 10.** Interrelación entre profundidad medida en metros y la potencia sedimentológica del sedimento en la zona W del lago de la Sala de Entrada de la cova Genovesa también medida en metros. Fuente; elaboración propia.

Por otro lado, en cuanto al core estratigráfico extraído podemos diferenciar tres tipos de sedimentos. Una primera capa de estrato, de 20 centímetros de potencia, que corresponde a un limo de arcilla marrón rojizo con una composición silícica. Una segunda capa, también de unos 20 centímetros de potencia, compuesta por materia orgánica descompuesta mezclada con limos de silicio. Finalmente, una tercera capa, la más profunda de las tres, de más de 30 centímetros de potencia sedimentaria, compuesta por limos arenosos grises de composición silícica.

Tras consultar los resultados obtenidos con Francesc Gràcia, éste nos señaló que este tipo de estratigrafía sedimentaria es común en las cavidades sumergidas mallorquinas, especialmente en su parte de entrada de la cavidad (Gràcia, 2015). Esto es debido a que los materiales sedimentarios, donde abunda la materia orgánica de las fibras vegetales, son arrastrados en momentos de intensa

precipitación externa dentro de la cavidad, produciendo así un lavado de la cobertura edáfica, la cual se introduce en la cavidad por las principales aberturas y vías de acceso a ella (Gràcia *et al.*, 2003, 2011; Gràcia, 2015) (Fig. 112).



**Figura 112.** Core estratigráfico extraído del subsuelo sumergido del lago de la entrada de la cova Genovesa. En él podemos diferenciar claramente sus estratos por su diferente color y granulometría producida por la escorrentía del suelo edáfico exterior. Fuente; elaboración propia.

#### **7.4.5. Resultados metodológicos obtenidos en la cova de la Font de Ses Aiguades**

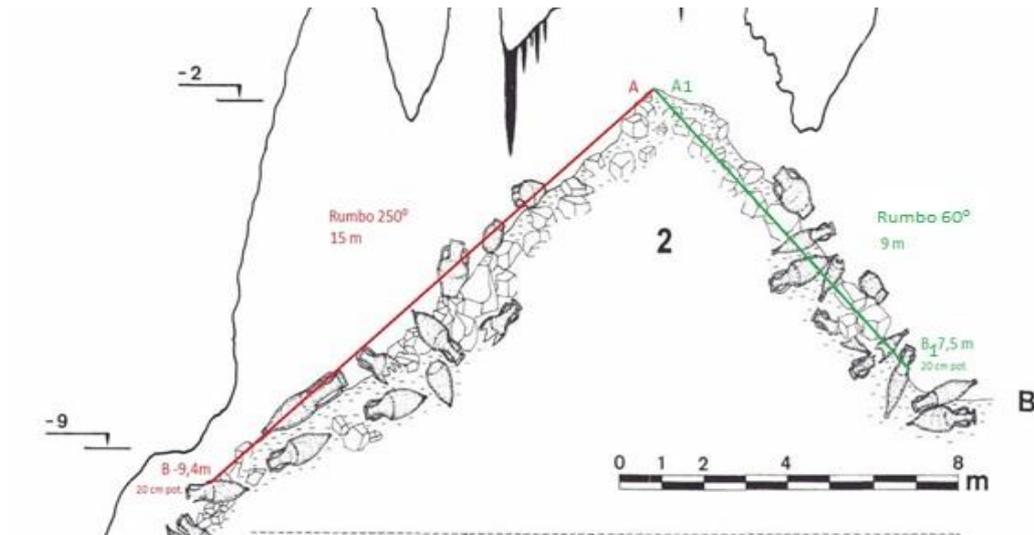
En este estudio, el más completo realizado en la presente tesis, fueron muchas las carencias técnicas encontradas y las dificultades para llevar cabo una prospección efectiva. El esfuerzo por crear una metodología de trabajo factible en su realización fue haciendo posible la correcta progresión de los trabajos y el éxito final de los mismos.

En el año 2018, se llevaron a cabo una serie de trabajos de prospección visual dentro de la cueva con el fin de estudiar y analizar la viabilidad metodológica de futuras campañas arqueológicas. Hasta aquel momento, la extracción de piezas cerámicas se había realizado sin un control arqueológico exhaustivo, lo que no nos había permitido la contextualización del yacimiento en su conjunto ni la contabilización de piezas cerámicas remanentes sumergidas. De este modo, era

necesario crear un registro y una base de datos que nos permitiera entender el yacimiento en todo su contexto arqueológico, mientras se discutía sobre el modo óptimo para hacerlo. Esto no significaba que las tareas realizadas hasta aquel momento no hubieran sido beneficiosas para el conocimiento del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades, ya que éstas nos habían permitido conocer a grandes rasgos su contexto general, pero sin duda debían ser completadas y mejoradas (Fumás *et al.*, 2022).

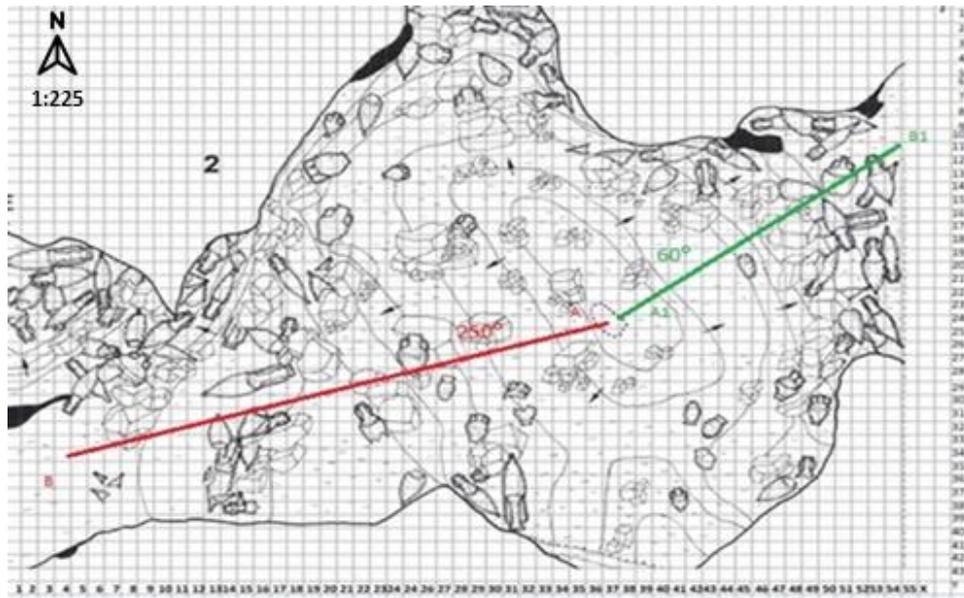
Así, los objetivos marcados en la intervención en la cova de la Font de Ses Aiguades en 2018 fueron la realización de una prospección visual para comprobar si el yacimiento había sido expoliado, puesto que desde la última intervención en 2002 se creía que podrían haber desaparecido parte importante del conjunto de piezas cerámicas, aunque, finalmente, esto no fue así. También, se realizaron mediciones de las pendientes del cono de derrumbe mediante una piqueta metálica centimetrada introducida a cada lado de la base del cono. De esta manera, se midió la potencia de sedimento que quedaba en el suelo sumergido, puesto que las investigaciones realizadas hasta la fecha indicaban que las piezas de cerámica habían caído cuesta abajo amontonándose unas encima de otras. Con la medición de la potencia sedimentológica al final de la pendiente, queríamos verificar la posible existencia de más posibles piezas enterradas (Fig. 116.1).

El cono de depósito de escombros, zona fértil del yacimiento arqueológico, actualmente, tiene una superficie proyectada de unos 200 metros cuadrados con un volumen aproximado de 63.25 metros cúbicos desde la cima hasta -7.5 metros de profundidad. El vértice del cono comienza a unos -2 metros de profundidad hasta -14 metros, ya dentro de la Galería de la Moraguese Typhlocíana, siendo los extremos los más ricos en material arqueológico, algo en principio lógico si observamos la pendiente y disposición del cono, lo cual pudo hacer que las piezas, al caer en el interior, rodaran hacia los extremos hasta conseguir la horizontalidad al encontrarse con un obstáculo (Fig. 113).



**Figura 113.** Modificación de plano topográfico esquemático del cono de colapso, ubicado en la Sala de les Ànfores, con las dos líneas prospectivas utilizadas en el año 2018. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001).

En la campaña de 2018, se trazaron dos líneas con la cinta métrica para conocer la ubicación exacta donde se introdujo la piqueta de metal, la cual nos mostraría la potencia de sedimento del suelo de la cueva. Así, mediante la medición por eje cartesiano, primero se lanzó una primera línea (A<sub>1</sub> - B<sub>1</sub>) de 9 metros de largo con rumbo de 60° hasta alcanzar una profundidad de -7.5 metros, y allí se midió una potencia sedimentológica de 20 centímetros. Posteriormente, se midió una segunda línea (A-B) de 15 metros de largo que fue lanzada con un rumbo de 250° llegando a una profundidad de -9.4 metros (Figs. 113 y 114). Allí, se midió de nuevo la potencia del sedimento siendo esta vez de 20 centímetros. Por lo tanto, en esta primera intervención supimos que una vez fuera del cono fértil la potencia de sedimento, en los acimuts revisados, no permitía el soterramiento de remanentes cerámicos de piezas enteras, lo cual nos indicaba y nos ajustaba la zona prospectiva a estudiar, localizada en la zona SW.



**Figura 114.** Vista de la planta del yacimiento con las líneas prospectivas realizadas en la campaña de viabilidad metodológica de 2018. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001).

Posteriormente, se introdujo un tubo de PVC en el sustrato arenoso del fondo de la cavidad para estudiar la estratigrafía. Pero, desafortunadamente, una vez que el tubo fue removido, tras ser extraído del suelo, todo el material se fue perdiendo gradualmente en contacto con el agua y el movimiento del espeleo-buceador al subir a la superficie, lo que no nos permitió tomar ningún tipo de muestra sedimentológica, aunque todo indicó que se trataba de una capa de arcilla uniforme sin variación estratigráfica (Fig. 116.1).

Posteriormente en el año 2019, se aprobó el Proyecto IASCM. El proyecto de tres años de duración tenía condicionada su continuidad a la viabilidad de las pruebas realizadas y a la consecución de medios humanos, logísticos y económicos que hicieran factible las diferentes campañas programadas.

Como cualquier proyecto arqueológico subacuático el Proyecto IASCM debía cumplir una serie de requisitos burocráticos y de índole administrativo ineludibles para el comienzo de las diferentes campañas pero, además, debía afrontar retos particulares y específicos causados por la casuística específica del estudio en una cueva sumergida tan compleja como esta.

La necesidad de cumplir con los protocolos de actuación y seguridad pero a la vez tener que cumplir con unos objetivos mínimos de trabajo obligó a exprimir al máximo al equipo humano y logístico en lo que se refiere a la puesta a punto de los distintos dispositivos electrónicos usados, aumento de la capacidad de las baterías, mejora de equipos fotográficos, disposición de amplia gama de botellas de aire y aumento del número de vehículos de transporte (Fig. 116.2).

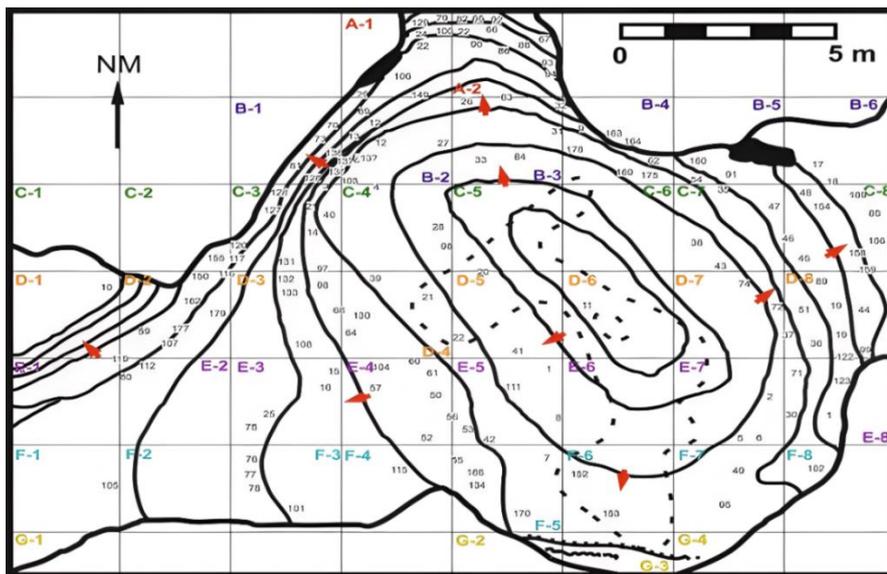
Concretamente en las prospecciones realizadas en la cova de la Font de Ses Aiguades en Alcúdia no solo fue necesario tener preparado todo el material para realizar las diferentes pruebas técnicas en el interior de la cavidad, sino que se tuvo que recurrir a instituciones y asociaciones externas al proyecto para poder cubrir las necesidades específicas que iban surgiendo. Un ejemplo fue la importante ayuda recibida por parte del Grupo Especial de Actividades Subacuáticas (GEAS) de la Guardia Civil en la campaña 2019 o del grupo de operaciones de rescate de la Federación de Espeleología Balear (FEB) en la campaña 2020 para poder descender por el pozo de acceso a la cavidad tanto el material como el equipo humano encargado de los trabajos arqueológicos. Todo ello sin olvidarnos de la colaboración de un equipo multidisciplinar de expertos nacional e internacional, que accedió a incorporarse al proyecto de investigación (Figs. 116.3 y 116.4).

La campaña del año 2020 debía cumplir con muchos de los objetivos marcados y debía responder a muchas más preguntas, tanto históricas como metodológicas, por ejemplo; ¿Por qué hay una montaña de sedimento dentro de la cueva?, ¿Por qué hay mucho más material arqueológico en los bordes de la pirámide que en sus pendientes?, ¿el agua de la cueva es potable?, ¿Por qué la cerámica encontrada en la cueva no sigue una cronología lineal en el tiempo?, ¿Cuál es la técnica que nos puede permitir el geoposicionamiento de todas las piezas remanentes en el más corto espacio de tiempo posible?, ¿hay más restos paleontológicos dentro de Ses Aiguades?.

Es cierto que el carácter metodológico del proyecto en ocasiones puede parecer ya suficiente, pero esto no es así ya que el empleo de una metodología nueva debe ayudarnos a responder todas las preguntas posibles y, a la vez, formular hipótesis nuevas, lejos de pragmatismos o suposiciones aleatorias.

Por lo tanto, tomando como punto de partida los trabajos realizados en el año 1999 por el equipo de Francesc Gràcia (GNM), bajo la autorización de la Consejería de Patrimonio de Mallorca, donde se recuperaron 189 piezas cerámicas (Gràcia *et al.*, 2001), pudimos conocer de una manera aproximada la posible ubicación, profundidad y tipología tanto de los restos extraídos como de los remanentes y, a la vez, crear una cuadrícula prospectiva con la cual poder relacionar las piezas cerámicas a estudiar con las ya extraídas, entendiendo el yacimiento arqueológico en su conjunto. Por consiguiente, y siguiendo la topografía realizada por Gràcia (2001) observamos un montículo con diferentes curvas de nivel donde el número de piezas remanentes se incrementaba a medida que aumentaba la profundidad. Es por esto por lo que, las tareas prospectivas debían consistir en completar la documentación con los restos cerámicos remanentes que se encontraban en la base del cono de escombros (Fig. 115).

Para documentar rápidamente el cono de depósito de escombros se trató de conseguir una fotogrametría completa del yacimiento arqueológico. Para ello fue necesario colocar una serie de jalones pintados en dos colores (rojo y blanco) en diferentes partes del cono para que el software fotogramétrico fuera capaz de reconocer las imágenes, realizar un solapamiento de éstas y escalar el modelo completo.



**Figura 115.** Planta de la topografía de la Sala de les Àmfores con la ubicación de las piezas extraídas. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001) (Modificación; Antonio J. Talavera).

Posteriormente, se realizó una lectura con el CTD del agua de la cavidad desde la Sala de les Ànfores hasta el final de la Galería dels Myotragus. Durante su inmersión el CTD recogió muestras de agua del pozo para un posterior análisis químico.

Y, por último, era necesario tomar diferentes puntos topográficos, con una estación total y con GPS diferencial, con la finalidad de buscar la máxima precisión en la planimetría del yacimiento. La campaña del 2020 pretendía realizar un salto cualitativo y cuantitativo en los datos recopilados para la consecución de un geoposicionamiento exacto de la distribución espacial de los restos arqueológicos. Para ello se tomaron las mediciones precisas de la distancia desde la superficie terrestre hasta el nivel freático del agua del interior del pozo. Además, se tomaron coordenadas de la vertical del pozo y de la línea actual de costa para redactar un informe que avalara las técnicas utilizadas y corrigiera errores manuales que pudieran ser sostenibles dentro de una tolerancia topográfica asumible.

#### *7.4.5.1. Resultados topográficos*

##### *7.4.5.1.1. El uso del sistema de radiolocalización PINGER*

De todos los métodos topográficos prospectivos utilizados en la campaña del año 2019 el más eficaz fue el PINGER de radiolocalización, debido a las pequeñas dimensiones de la cavidad. Concretamente, al usar el receptor del PINGER el equipo no tuvo grandes dificultades para encontrar el lugar exacto donde la señal era más fuerte, ya que la distancia entre el transmisor y el receptor era muy pequeña. Esto se debe a que la distancia entre el techo rocoso y la superficie terrestre no consta de una gran longitud (Smith, 2013, 2018).



**Figura 116.** Imágenes del equipo humano multidisciplinar del Proyecto IASCM. **1.** Trabajos de medición de la potencia sedimentaria mediante la introducción de una varilla metálica centimetrada. (Foto; Autor). **2.** El técnico electrónico Ramón Buxó soldando las baterías del emisor de radiolocalización PINGER. (Foto; Autor). **3.** Miembro del GEAS colocando el arnés al Dr. Florian Huber antes de descender por el pozo de acceso. (Foto; Autor). **4.** El técnico en SIG Pablo Fraile ajustando los diferentes dispositivos antes de la inmersión. (Foto; Autor). **5.** Colocación del emisor PINGER sobre los restos óseos del *Myotragus balearicus* en la galería del mismo nombre (Foto; Miguel Ángel Perelló).

Así, en un espacio breve de tiempo se pudo obtener uno de los primeros resultados programados que eran el geoposicionamiento geográfico y el conocimiento exacto en la ubicación de los restos de *Myotragus balearicus* con respecto a la superficie de la cavidad en la coordenada UTM 31N, X: 514177, Y: 4409930.8 (Figs. 116.5 y 117.1).

Este dato pudo ser utilizado para los análisis históricos y geográficos posteriores de la cavidad y para responder preguntas sobre la existencia de entradas antiguas desaparecidas a la cavidad. Además, este geoposicionamiento nos sirvió para hacer una triangulación exhaustiva del tamaño de la cueva, comprobando si era correcta la topografía clásica y la escala geográfica manual.

Tal como se explica en la sección anterior, (capítulo 5.6.2.2), sobre el funcionamiento del PINGER, cuando el suelo es horizontal, la profundidad del transmisor o emisor subterráneo con respecto al emisor es de 1.77 veces la

distancia a cero. En este caso la distancia cero fue de unos 4.5 metros, lo que indica que el *Myotragus balearicus* estaba aproximadamente a 8 metros de profundidad con respecto a la superficie.

Por último, cuando superpusimos el plano topográfico de la cueva sobre el ortofotomapa y añadimos la ubicación exacta del transmisor de radiolocalización, pudimos comprobar con un alto grado de rigurosidad y fiabilidad la orientación real de la topografía con respecto al norte geográfico (Fig. 117.2).

Por ende, gracias a las coordenadas tomadas por el GPS portátil del punto de localización del emisor PINGER y de la entrada de acceso a la cueva, a través del pozo, teníamos dos coordenadas aproximadas que debían ser confirmadas en campañas futuras por dispositivos GPS diferencial y estación total (Pachas, 2009; Leica-Geosystems, 2020a).

#### *7.4.5.1.2. La lectura del mapeo por hilo. El dispositivo MNEMO*

De todos los dispositivos tecnológicos utilizados en esta cueva, el más complejo y difícil de utilizar debido a sus problemas de calibración fue el MNEMO. Aunque el dispositivo no requería un gran conocimiento técnico para su funcionamiento, si era necesaria cierta práctica en su empleo cuando se precisa de mediciones de hilo rigurosas. Además, este dispositivo es sensible a la luz y a los cambios bruscos de temperatura, haciendo imposible todo tipo de calibración sino se utiliza en las condiciones adecuadas (Kister, 2017).

El problema más común al pasar los datos del dispositivo al software del ARIANE era el error en el acimut o rumbo de línea. Cada línea guía dentro de una cueva, no importa cuán pequeña sea la sección de esta, tiene un rumbo, que debe ser coincidente desde el principio hasta el final. En nuestro caso, tan sólo una desviación del 1.5% era tolerante de error, mientras que cualquier porcentaje superior era considerado como una línea incorrecta.

Después de usar el dispositivo tres días consecutivos se redujo el porcentaje de error del acimut, desde el principio hasta el final de la línea que atravesaba la

Galería dels Myotragus, lo que nos indicaba el modo de calibrar mejor el dispositivo (Fig. 117.3). Sin embargo, la coordenada obtenida por el PINGER de radiolocalización, que se encontraba justo por donde pasaba el hilo guía, nos indicó los errores de nuestras mediciones.

Así, después de solaparse en el mismo mapa SIG; la topografía clásica hecha por el equipo del SEB, las coordenadas georreferenciadas tomadas en la vertical del pozo de acceso, las coordenadas de la ubicación de radiolocalización de PINGER y, por último, la línea del MNEMO, se observó claramente que las mediciones de este último tan solo eran aproximadas, lo cual no podía considerarse un método válido para nuestra investigación (Fig. 117.4).



**Figura 117.** Documentación topográfica de la cova de la Font de Ses Aiguades mediante la utilización del mapeo por hilo y la radiolocalización. **1.** Detalle del punto GPS en el cual se localizó la señal del emisor PINGER. (Autor; Pablo Fraile). **2.** Topografía sobre ortofotomapa con detalle del punto de localización del emisor PINGER. Fuente; (Autor; Pablo Fraile). **3.** Error en el acimut de la línea tomada por el MNEMO en la cova de la Font de Ses Aiguades en la campaña arqueológica de 2019. Fuente; elaboración propia. **4.** Ortofotomapa con superposición de la planta topográfica de la cavidad con error de línea del MNEMO y con la ubicación de PINGER en la denominada Galería dels Myotragus. (Autor; Pablo Fraile).

Los errores cometidos al realizar la calibración del MNEMO quedaron reflejados en la tabla de datos del programa de software ARIANE, donde pudimos comprobar cómo absolutamente todas las mediciones eran erróneas. A modo de ejemplo, concretamente en el track número 6, que va desde la Sala de les Àmfores hasta el final de la Galería dels Myotragus presentó una diferencia en el acimut de más de 40°, lo que indicaba nuestro error<sup>78</sup> (Tabla 14).

ID	Name	Fro...	Section	Type	Length	Azimut	Depth	Longitude	Latitude	Comment
0	START	-1	ses aiguades 1	START	0.0	0.0	6.0	3.165465	39.839713	START
1		0	ses aiguades 1	REAL	5.68	266.8	2.83	0.0	0.0	
2		1	ses aiguades 1	REAL	28.2	221.7	1.43	0.0	0.0	AziN=264.8 AzOUT=178.6
3	START	-1	ses aiguades 1	START	0.0	0.0	6.0	3.165465	39.839713	START
4		3	ses aiguades 1	REAL	29.18	72.3	2.82	0.0	0.0	AziN=48.8 AzOUT=95.8
5		4	ses aiguades 1	REAL	5.18	97.95	2.89	0.0	0.0	
6	START	-1	ses aiguades 1	START	0.0	0.0	6.0	3.165202	39.839713	START
7		6	ses aiguades 1	REAL	29.18	72.3	2.82	0.0	0.0	AziN=48.8 AzOUT=95.8
8		7	ses aiguades 1	REAL	5.18	97.95	2.89	0.0	0.0	
9	START	-1	Pinger7	START	0.0	0.0	2.82	3.165493	39.839852	START
10	CLOSURECLOSURE	7	ses aiguades 1	CLO...	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	CLOSURE

**Tabla 14.** Datos del software ARIANE con las mediciones de los tracks realizados en la cova de la Font de Ses Aiguades donde se aprecia en el círculo rojo como el acimut de entrada a la línea era de 48. 8° y el acimut de salida 95. 8°, siendo valores muy alejados uno del otro. Fuente; elaboración propia.

#### 7.4.5.1.3. Metodología usada para la obtención de la coordenada del Punto O de referencia

Para completar el geoposicionamiento de los restos cerámicos y de los restos de *Myotragus balearicus* había que dar un valor al punto ubicado en la vertical del pozo de acceso a la cavidad y cúspide de la pirámide de depósito de escombros. A ese punto concreto se le denominó “punto 5000”, y es el que nos serviría de referencia. Para ello, fue necesario el uso de un GPS diferencial y una estación total para la obtención de una coordenada UTM (Fig. 118). Así, se tomaron 5

<sup>78</sup> Todos los expertos en topografía y mapeo de cables, dirigidos por Sebastien Kister, nos hablan de la necesidad de tener el dispositivo MNEMO en la oscuridad y dentro del agua durante mucho tiempo antes de hacerlo funcionar. Sólo de esta manera se produce una calibración correcta a través de una presión adecuada en su pantalla líquida y un desvío térmico aceptable para la correcta lectura del dispositivo.

puntos adicionales al punto 5000, correspondiente a la vertical del pozo de acceso a la cueva, corroborando que nuestro punto 0 de referencia correspondía a la coordenada UTM 31N, X: 514132.708, Y: 4409979.195 (Tabla 15).

ID. PUNTO	X (m)	Y (m)	H (m)	Px(m)	Py(m)	PH(m)
1000	514138,919	4409968,721	7,02	0,004	0,007	0,004
1001	514151,708	4409967,604	7,605	0,008	0,008	0,009
1002	514144,201	4409961,155	6,96	0,011	0,005	0,005
1003	514148,074	4409975,772	7,854	0,002	0,002	0,012
1004	514132,132	4409954,669	6,122	0,007	0,014	0,014
5000	514132,708	4409979,195	9,288	0,021	0,022	0,027

**Tabla 15.** Diferentes coordenadas de los seis puntos tomados con la estación total. La fila verde indica la coordenada del punto 5000 correspondiente al punto 0. (Autor; Pablo Cantuel).

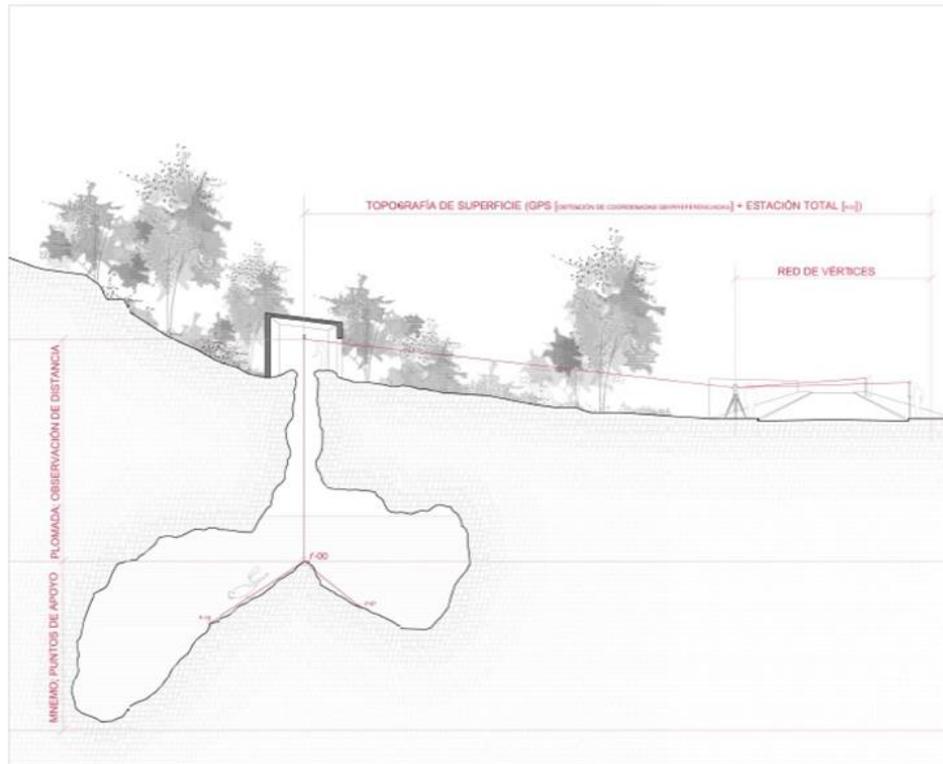
El método topográfico utilizado en la obtención de la coordenada se basó en la observación directa de las coordenadas georreferenciadas de una serie de vértices que rodean a la entrada, para ser usados como puntos fijos en el proceso de cálculo posterior de la red que compone el total de vértices hasta el punto final de la poligonal en el espacio sumergido. Para ello se empleó, de nuevo, un levantamiento RTK de las mismas por tecnología GPS, usando un equipo, marca Leica, modelo GS16, mediante el servicio de posicionamiento en Tiempo Real y diferencial GNSS<sup>79</sup>, conectando con la Red Geodésica Nacional de Referencia de Estaciones Permanentes (ERGNSS) facilitada por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y mediante una solución VRS (Estaciones de Referencia Virtual) (Fig. 118).

<sup>79</sup> El Sistema de Posicionamiento GPS/GNSS en Tiempo Real de España es un servicio gratuito de posicionamiento de precisión en tiempo real que suministra una solución homogénea y continua en toda España, además de proporcionar instantáneamente una precisión del orden de algunos centímetros.



**Figura 118.** Polígono sobre ortofotomapa (color azul) donde se indica el lugar donde se tomó cada uno de los puntos adicionales para corroborar el punto 5000, correspondiente con la coordenada final respecto a la vertical del pozo de la cova de la Font de Ses Aiguades (flecha amarilla). (Autor; Pablo Cantuel).

Como siempre, la geometría de la cavidad condicionó la observación de campo. La cova de la Font de Ses Aiguades presenta una geometría particular. Su entrada se desploma verticalmente desde el interior de una pequeña caseta, que cuenta en su interior con una viga horizontal y un gancho soldado a la misma que marca el descenso vertical. Una vez instalados los equipos de seguridad, se descendió una decena de metros por un espacio angosto hasta encontrarnos con el yacimiento en su vertical. Se estableció o consideró el gancho de la viga de la caseta como uno de los puntos de la red de vértices que unían las observaciones desde el espacio exterior al interior, debido que este tiene comunicación física directa entre la superficie y la cueva por su vertical (Fig. 119).



**Figura 119.** Imagen donde se aprecia la metodología topográfica utilizada para obtener el punto 0 de control, correspondiente al vértice superior del cono arqueológico sumergido de la cova de la Font de Ses Aiguades. (Autor; Pablo Cantuel).

Para obtener las coordenadas georreferenciadas del punto del gancho que marca la vertical de la entrada a la cueva, punto de la red que enlaza las observaciones interiores y exteriores, se utilizó una estación total topográfica marca Leica modelo TS16 con una precisión angular de 1 segundo sexagesimal (1'') y una precisión en la medida de distancias de 1 milímetro + 1.5 ppm. Gracias a ella se observó una red topográfica de vértices que partía de los puntos observados con tecnología GPS en el exterior hasta ese punto materializado en el gancho de la caseta. La observación de todos los puntos que componen esta red densificada se realizó mediante topografía clásica, imponiendo de nuevo dos premisas de obligado cumplimiento, que aseguraron la eliminación de errores sistemáticos y la compensación de accidentales; la observación mediante regla de Bessel (círculo directo e inverso) y la observación, desde cualquier base, de todas las demás visibles desde ella. Con ello fuimos capaces de obtener las coordenadas georreferenciadas del punto que marca el umbral entre el espacio interior y el

exterior. El procedimiento consistió en el estacionamiento del equipo topográfico sobre uno de los vértices observados con GPS y de coordenadas conocidas, desde el mismo se observó tres vértices más con la finalidad de obtener la desorientación del equipo y se realizó, por radiación, la observación del punto del gancho que une el espacio exterior con el yacimiento (Figs. 118 y 119).

En la vertical del punto del gancho, sobre la cúspide del yacimiento, se instaló un clavo de acero con la finalidad de marcar un punto más de la poligonal, ahora en el espacio confinado y sumergido. Para definir ese punto, desde el gancho se dejó caer una plomada atada a un hilo que por gravedad marcó la vertical de nuestra medición. Teniendo en cuenta la teoría de planos acotados<sup>80</sup>, el punto del gancho y el punto en la cúspide del yacimiento tenían la misma coordenada georreferenciada, planimétricamente<sup>81</sup> hablando. Para la obtención de la tercera coordenada, la coordenada altimétrica, se midió, con la ayuda de un flexómetro, la distancia que representa el punto de la cúspide con el gancho y se restó esa cantidad a la altitud ortométrica<sup>82</sup> del punto del gancho (Fig. 119).

Gracias al uso de toda esta metodología pudimos obtener un punto con coordenadas conocidas y georreferenciadas dentro del espacio confinado sumergido y mediciones rigurosas tanto de la distancia desde la superficie terrestre hasta el nivel freático del agua del interior del pozo como de las coordenadas de la vertical del pozo y de la línea actual de costa. Esto nos permitió geo posicionar cualquier resultado obtenido de la fotogrametría y con ello el yacimiento entero, gracias a la obtención de las coordenadas georreferenciadas de los puntos de control (Fig. 120).

---

<sup>80</sup> El sistema de planos acotados es una simplificación del sistema diédrico ortogonal donde se utiliza un único plano de proyección (también denominado plano de origen, del cuadro, de referencia, del horizonte o de comparación) y que se corresponde con el plano horizontal del sistema diédrico ortogonal, el cual consiste en un conjunto de reglas o principios aplicados a dos planos perpendiculares sobre los que se proyectan los objetos (puntos, rectas y curvas o cuerpos).

<sup>81</sup> La planimetría es la parte de la topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos que tienden a conseguir la representación a escala de todos los detalles interesantes del terreno sobre una superficie plana, prescindiendo de su relieve y se representa en una proyección horizontal.

<sup>82</sup> La altura ortométrica se define como la distancia vertical entre la superficie física de la Tierra y la superficie del geoide. Esta distancia se mide a lo largo de la línea de plomada, la cual es la curva que es tangencial a la dirección de la gravedad en cualquier punto.



**Figura 120.** El topógrafo Pablo Cantuel tomando puntos con la estación total en el acceso a la cova de la Font de Ses Aiguades. **1.** Imagen de la estación total, la cual permitió realizar los cálculos de coordenadas de campo, replanteo de puntos y cálculo de acimut y distancias. (Foto; Autor). **2.** El topógrafo Pablo Cantuel midiendo la distancia con cinta métrica desde el gancho hasta el nivel freático del agua en la campaña arqueológica del año 2020. (Foto; Autor).

#### 7.4.5.2. Resultados del proceso fotogramétrico y de documentación

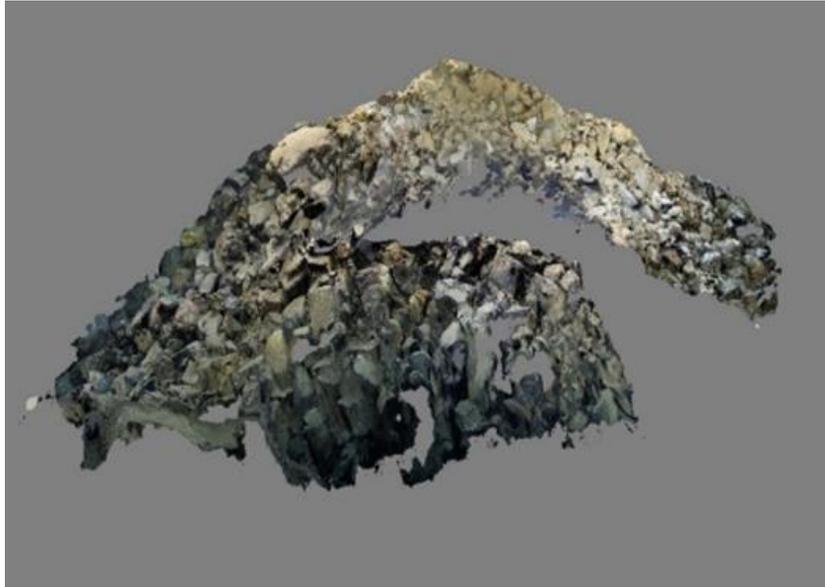
##### 7.4.5.2.1. Resultados en la progresión del primer proceso fotogramétrico

La primera prueba fotogramétrica se realizó en la campaña 2019, con la captura fotográfica de todo el perímetro del yacimiento, con la intención de conseguir una fotogrametría completa del área a prospectar. En aquel momento, solo pudo ser aplicada la técnica de grabación en video, ya que la captura fotográfica resultaba muy compleja debido a la falta de experiencia, la dificultad técnica y a la estrechez entre el cono de depósito de escombros y las paredes de la Galería de la Sala de les Àmfores.

Los esfuerzos estaban encaminados a la elaboración de una planimetría arqueológica completa, tomando como referencia la topografía realizada por el equipo de GNM entre los años 1998 y 2000 (Gràcia *et al.*, 2001) (Fig. 121).

Para las tareas de captura fotográfica subacuática se utilizó una Canon 1DX Mark II de última generación. Debido a la percolación durante la inmersión se decidió filmar la escena en lugar de tomar fotografías, extrayendo del video las imágenes de mejor calidad. Para conseguir una iluminación multidireccional tanto de las

piezas como del yacimiento se usaron dos luces de video de 3800 lumens en lugar de usar una linterna, ya que la percolación combinada hubiera causado una retrodispersión masiva<sup>83</sup>. Por esta razón, fue necesario el apoyo logístico de dos buceadores que iluminaron la escena con focos adicionales, diferentes a los utilizadas por el espeleo buceador que realizaba la filmación en video.



**Figura 121.** Modelo fotogramétrico incompleto del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades realizado en la campaña 2019, donde la falta de una metodología de trabajo correcta provocó un modelo sin orientación ni escala. (Autor; Florian Huber).

La escena fue filmada en 4K (4.096 x 2.160 píxeles), utilizando 1/100 de velocidad de obturación (50 fotogramas) para obtener imágenes nítidas. Se crearon unos 12 minutos de material (80 GB de memoria), hasta que la percolación aumentó, debido al gas exhalado por los buceadores durante la grabación haciendo inviable continuar con la filmación. Posteriormente, el clip de vídeo grabado fue exportado a Full HD, usando el software “Video to Image Converter” extrayéndose 768 imágenes. Estas imágenes se utilizaron para crear

---

<sup>83</sup> La retrodispersión o retrorreflexión es un fenómeno físico en el cual las ondas que inciden en un material en un ángulo determinado son reflejadas en el mismo ángulo, volviendo a la fuente que las produjo. Dicho de otra forma, la trayectoria del haz incidente coincide con la del haz reflejado.

un modelo 3D con dos programas diferentes: Agisoft Metashape Professional y “Capturing Reality”<sup>84</sup>, en este último se usaron hasta 3073 imágenes.

Ambos programas generaron un modelo 3D imperfecto debido a varias razones; I) a una carencia en la preparación específica para la inmersión y a las grandes dificultades de orientación dentro de la cavidad por parte del equipo humano que llevaba las tareas técnicas de iluminación y fotografía, II) a la percolación producida debido al gas exhalado, III) a la necesidad de un cambio en la estrategia de grabación, ya que se tuvo que realizar una grabación perimetral completa del cono arqueológico para tomar fotografías nítidas que permitieran la superposición de la escena y IV) a las dimensiones de la cueva, las líneas guía y las estalactitas, las cuales provocaban la necesidad de tener una flotabilidad perfecta con un trimado<sup>85</sup> difícil de conseguir al maniobrar por encima del sitio arqueológico.

Tras analizar los problemas generados en las inmersiones con el equipo técnico en fotogrametría, y aunque la decisión de usar la grabación en vídeo fue correcta, se debían valorarse diversas opciones de mejora en intervenciones futuras. Para ello se llegó a unas primeras conclusiones sobre los puntos de mejora metodológica. Algunos de ellos fueron;

I) Una mejora en la sesión informativa previa a la inmersión, donde cada miembro del equipo conociera su rol exacto en el interior de la cavidad, siendo necesario una primera inmersión de orientación previa a la introducción del equipo humano experto en fotografía, II) toda la zona por fotografiar debía presentar jalones, escalas y dianas fotogramétricas<sup>86</sup> para la mejora del solapamiento fotográfico, paso previo para la consecución de resultados fotogramétricos óptimos, III) valorar la necesidad de utilizar recicladores de aire para evitar la percolación y mejorar el entrenamiento previo del equipo, con el objetivo de conseguir un trimado perfecto que no pusiera en peligro la integridad física de los buceadores y

---

<sup>85</sup> El trimado es el ángulo del buceador en el agua en términos de alineación con la dirección del movimiento. Durante la mayor parte de la inmersión el buzo debe permanecer en lo que se denomina trimado neutro, una posición horizontal paralela a la dirección de desplazamiento.

<sup>86</sup> Las dianas fotogramétricas, corresponden a puntos geográficos estratégicos de referencia distribuidos a lo largo del entorno de mapeo. En otras palabras, son localizaciones que servirán como referencias visuales en los mapeos y que posteriormente podrán ser utilizadas como puntos estratégicos a emplear durante la georreferenciación de las imágenes para posicionar correctamente los resultados.

IV) recomendar la calidad fotográfica en Full HD como valor suficiente debido a que las imágenes con calidad 4K crean una gran cantidad de datos mientras que la calidad de las imágenes con el modelo 3D no obtiene un resultado mucho mejor.

#### 7.4.5.2.2. *Hacia un modelo fotogramétrico completo*

La campaña arqueológica del año 2020 tomó como punto de partida los trabajos realizados en el año 1999, por el equipo de Francesc Gràcia, y la mejora de los fallos realizados en la campaña del año 2019 (Gràcia *et al.*, 2001). Ahora, tocaba geo posicionar los remanentes cerámicos mientras se creaba una cuadrícula prospectiva imaginaria, en la cual poder relacionar las piezas cerámicas a estudiar con las ya extraídas y depositadas en el museo de Mallorca (Figs. 122.1 y 122.2), entendiendo así el yacimiento arqueológico en su conjunto. De este modo, siguiendo la topografía realizada por Gràcia (2001) observamos un montículo con diferentes curvas de nivel donde el número de piezas cerámicas existentes aumentaban a medida que aumenta la profundidad (Fig. 115). Por esta razón, las tareas prospectivas debían consistir fundamentalmente en completar esta documentación con los restos cerámicos remanentes que se encontraban en la base del cono de depósito de escombros.

Para conseguir el objetivo de mejorar la fotogrametría del modelo 3D era necesario bajar más material y equipo a la cueva (Fig. 122.3).



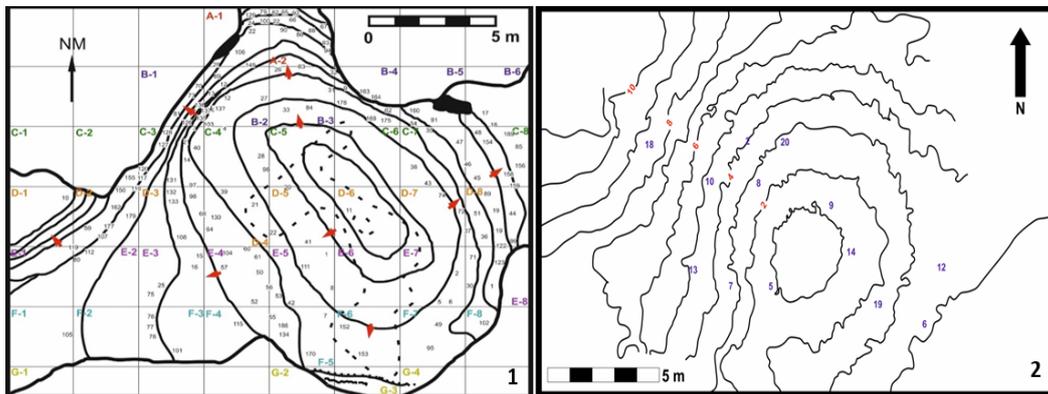
**Figura 122.** Imágenes de la campaña 2020 en la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Cerámica procedente de la campaña de extracción del año 1999 conservados en el Museo de Mallorca. (Imágenes tomadas para el documental de la TV suiza SRF1). **2.** Detalle de la cerámica conservada en el Museo de Mallorca procedente del yacimiento arqueológico de la cova de la Font de Ses Aiguades. (Imágenes tomadas para el documental de la TV suiza SRF1). **3.** Técnicos de la Federación Espeleológica Balear (FEB) encargados de la seguridad del equipo de inmersión y de bajar los equipos técnicos por la vertical del pozo. (Foto; Autor). **4.** Detalle de las etiquetas y jalones utilizados para registrar los remanentes cerámicos de la cueva. (Foto; Autor).

La premisa fundamental era colocar una serie de jalones pintados en dos colores (rojo y blanco) en diferentes partes del cono de escombros del yacimiento para que el software fotogramétrico fuera capaz de reconocer las fotografías, realizar un solapamiento de éstas, conocer su ubicación y escalar el modelo completo. Además, era necesario aprovechar la claridad del agua para colocar una serie de

etiquetas numeradas en todos los restos cerámicos susceptibles de ser identificados tipológicamente, ya fuera por sus bordes, cuellos o asas (Fig. 122.4).

La prioridad de la campaña era conseguir unas buenas fotografías que completaran el modelo fotogramétrico, para ello se decidió prescindir de focos suplementarios y entrar al agua solo con una cámara y dos buzos auxiliares que portarían flashes denominados esclavos<sup>87</sup>, consiguiendo una cobertura lumínica perfecta de la pieza a fotografiar.

Las labores de fotogrametría fueron llevadas a cabo por el técnico en fotogrametría en cavidades y ambientes confinados y profesor de la Global Underwater Explorer (GUE), el británico John Kendall, el cual en dos días de trabajo consiguió completar el nuevo modelo fotogramétrico de todo el cono de derrumbe del yacimiento, lo que generó una nueva morfología del yacimiento y de la topografía de la Sala de les Ànfores (Figs. 123.1, 123.2 y 124.1).



**Figura 123.** Distintas morfologías del cono de la Sala de les Ànfores; **1.** Topografía clásica de la cueva con las diferentes curvas de nivel de profundidad. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001). **2.** Nueva morfología del cono obtenida mediante la obtención del modelo fotogramétrico con las curvas de nivel en profundidad. (Autor; John Kendall).

<sup>87</sup> Es el dispositivo sensible a la luz, que transmite órdenes de disparo a las unidades de flas electrónico-adicionales, como respuesta a la luz emitida por la unidad central conectada a la cámara, para disimular las sombras. Así, la escena queda cubierta por la luz que disparan ambos flashes, los cuales son colocados desde el ángulo que prefiera el fotógrafo para lograr la iluminación deseada para la escena.

Los resultados preliminares pudieron ser visualizados a través de la aplicación DronLab<sup>88</sup> en la cual pudimos observar el modelo cenital en planta de la pirámide de derrumbe con la distribución de material alrededor de la misma y la identificación de las piezas arqueológicas sobre el yacimiento<sup>89</sup>.

El software Agisoft Metashape Professional nos ofreció las coordenadas X, Y, Z, en el sistema imagen, para cada punto en el que se encontraba ubicada cada una de las piezas arqueológicas (Fig. 124.2). El alzado del primer renderizado del modelo fotogramétrico en 3D fue posible visualizarlo en el modelo de Skechtfab<sup>90</sup> y compartirlo<sup>91</sup>. En él observamos realmente la complejidad del yacimiento casi totalmente agotado, puesto que las piezas arqueológicas solo se encontraban en un porcentaje importante en las partes bajas y profundas del cono. Para poder observar con más detalle y comenzar a contabilizar y calcular los remanentes cerámicos utilizamos de nuevo la aplicación DronLab<sup>92</sup> con la que Kendall nos presentaba un modelo cenital en planta en la que pudimos apreciar, de un modo general, toda la pirámide de derrumbe con la distribución de material alrededor de la misma (Fig. 124.3).

La utilización de la aplicación Dronlab nos permitió acercar el modelo 3D tanto como fuera necesario, observando de una manera nítida la tipología y la forma de todos los restos geológicos y arqueológicos del conjunto. Gracias a esta herramienta de visualización hemos conseguido completar en una base de datos y en una serie de fichas arqueológicas todo el material cerámico clasificable.

#### *7.4.5.2.3. El estudio fotogramétrico de las piezas cerámicas individuales*

Por otro lado, la coyuntura logística, humana y temporal permitió de forma excepcional, tras terminar los trabajos programados preferentes, realizar

---

<sup>88</sup><http://dronlab.unex.es>

<sup>89</sup> <https://dronelab.io/map/public/viewer/8ebc16582d94466e904ee5b0bdd0fb1a>

<sup>90</sup> Modelo 3D Skechtfab Ses Aiguades

<sup>91</sup> <https://youtu.be/tpLxPU5po5g>.

<sup>92</sup> <https://dronelab.io/map/public/viewer/8ebc16582d94466e904ee5b0bdd0fb1a>

fotografías de ciertas piezas cerámicas concretas con el objetivo de mejorar y completar la base de datos generada y difundir, a modo general, las posibilidades de la fotogrametría en condiciones extremas. Por consiguiente, se generó el modelo fotogramétrico de tres piezas<sup>93</sup> concretas, usando de nuevo el software Agisoft Metashape Professional. Las piezas son;

### **Pieza número 2**

El número 2 corresponde a un fragmento cerámico atribuible posiblemente a un cántaro mallorquín correspondiente cronológicamente al 1700 d.C. En la pieza, mal conservada, tan solo permanece intacta la parte del cuello. Este alto nivel de fragmentación se debe posiblemente a la rotura provocada por la caída de rocas sobre la pieza (Coll, 2020) (Fig. 124.4).

### **Pieza número 10**

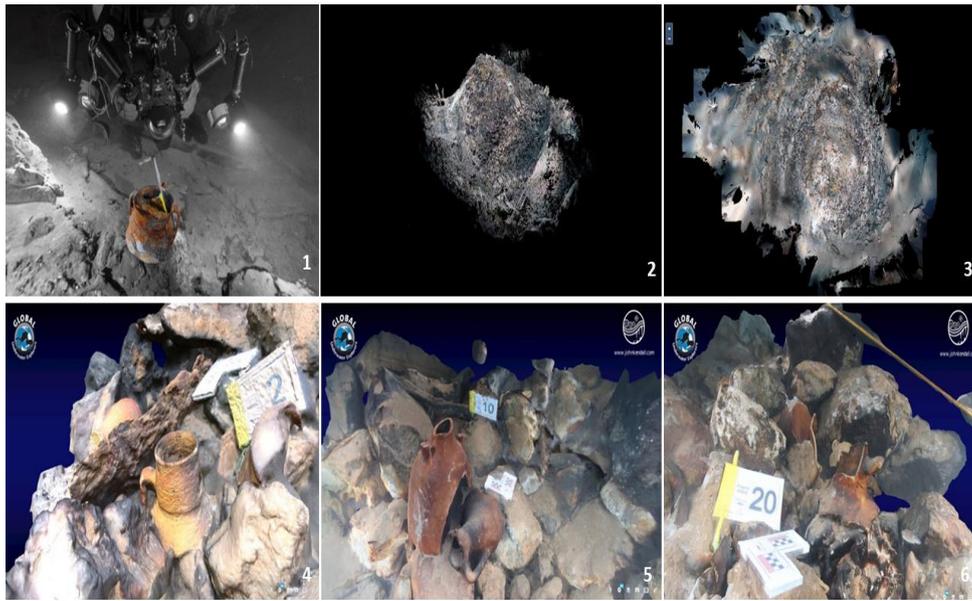
Con el número 10 se registraron dos objetos (10.1 y 10.2). En este caso se trata de un ejemplar compuesto por parte del cuello, los hombros y el arranque de ambas asas, cuyas paredes se extienden unos 30 cm hasta la fractura. La sección de los arranques de las asas de tendencia redondeada y la apertura de éstas, nos hacen sospechar que se trate de un ánfora tarraconense Pascual 1 con una cronología desde 30 a.C. hasta 20 d.C. (Bernal y Ribera, 2008; Carreras, 2016) (Fig. 124.5).

### **Pieza número 20**

Esta pieza conserva parte de su cuello y parte de un asa. A pocos centímetros se encuentran dos fragmentos más, una base y lo que parece parte del cuerpo. Muy posiblemente se traten de fragmentos de un mismo objeto. Posiblemente se trate de un cántaro mallorquín de principios del siglo XVIII (Gràcia *et al.*, 2001; Coll, 2020) (Fig. 124.6).

---

<sup>93</sup> Se puede ver el modelo 3D clicando sobre el número de pieza (en negrita). Contraseña GUE



**Figura 124.** Trabajos de fotogrametría subacuática en la cova de la Font de Ses Aiguades. **1.** Fotografía del momento en que John Kendall fotografiaba la pieza número 22 correspondiente a una jarra musulmana. (Foto; Miguel Ángel Perelló). **2.** Modelo fotogramétrico 3D realizado por John Kendall para el Proyecto IASCM 2020. Esta es la primera vez que podemos observar el cono de depósito de escombros completo sin los denominados “gaps” o huecos que se producen por un mal solapamiento de las fotografías durante el renderizado del modelo. (Autor; John Kendall). **3.** La vista en planta del conjunto arqueológico nos da una idea más fidedigna de las dimensiones del cono y de la distribución del material arqueológico. Una pirámide de rocas, sedimento y gravas compactadas junto a pequeños fragmentos de cerámica diseminada sin orden lógico por toda la pirámide. (Autor; John Kendall). **4.** Captura de pantalla del modelo 3D de la plataforma Sketchfab correspondiente a un cántaro mallorquín (1700 d.C.). (Autor; John Kendall). **5.** Captura de pantalla del modelo 3D de la plataforma Sketchfab correspondiente a un cántaro ánfora Pascual 1 Tarraconense. (Autor; John Kendall). **6.** Captura de pantalla del modelo 3D de la plataforma Sketchfab correspondiente a un cántaro mallorquín fragmentado (1700 d.C.). (Autor; John Kendall).

#### *7.4.5.2.4. Geoposicionamiento final de las piezas cerámicas según modelo fotogramétrico*

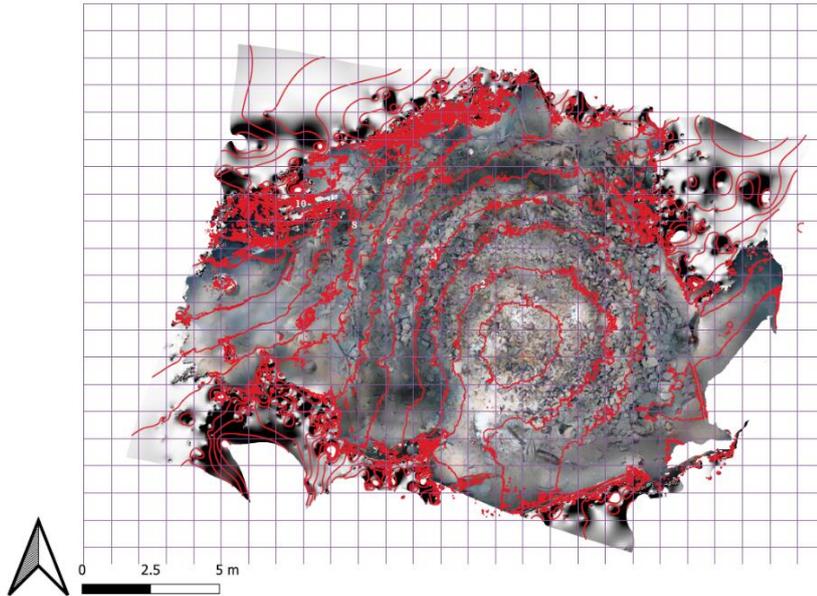
El geoposicionamiento estándar del modelo fotogramétrico se obtuvo dando un valor de 0.00 a la coordenada del vértice de la pirámide (punto 5000), lo cual generó una serie de coordenadas locales que, a la vez, también nos dieron un

geoposicionamiento (X, Y, Z) de las piezas cerámicas documentadas respecto a ese punto 0. Tras obtener esas coordenadas locales primarias introducimos la coordenada obtenida por GPS diferencial de la vertical del pozo (X, Y, Z) en el sistema ETRS 89 UTM 31, recalculando de este modo el modelo y dándonos las coordenadas reales finales del geoposicionamiento de cada una de las piezas documentadas con etiquetas durante la inmersión (Tabla 16).

	Coordenadas locales			Coordenadas globales ETRS 89 UTM 31		
	X	Y	Z	X(m)	Y(m)	H(m)
Referencia	0,000	0,000	0,000	514132,708	4409979,195	0,338
Punto 0	-0,560	0,315	-2,676	514132,148	4409979,510	-2,338
Pieza núm. 2	-2,480	2,897	-5,957	514130,228	4409982,092	-5,619
Pieza núm. 5	-1,394	-1,102	-3,738	514131,314	4409978,093	-3,400
Pieza núm. 6	5,678	-2,149	-5,640	514138,386	4409977,046	-5,302
Pieza núm. 7	-2,632	-1,549	-5,249	514130,076	4409977,646	-4,911
Pieza núm. 8	-2,369	1,037	-4,877	514130,339	4409980,232	-4,539
Pieza núm. 9	1,205	1,490	-3,207	514133,913	4409980,685	-2,869
Pieza núm. 10	-3,695	1,173	-6,524	514129,013	4409980,368	-6,186
Pieza núm. 12	6,173	0,043	-5,891	514138,881	4409979,238	-5,553
Pieza núm. 13	-4,007	-1,079	-6,727	514128,701	4409978,116	-6,389
Pieza núm. 17	4,884	-2,531	-5,433	514137,592	4409976,664	-5,095
Pieza núm. 18	-5,763	2,502	-10,116	514126,945	4409981,697	-9,778
Pieza núm. 19	3,708	-1,857	-4,335	514136,416	4409977,338	-3,997
Pieza núm. 20	-0,740	3,657	-5,143	514131,968	4409982,852	-4,805
Myotragus Skull	-4,150	3,855	-8,415	514128,558	4409983,050	-8,077

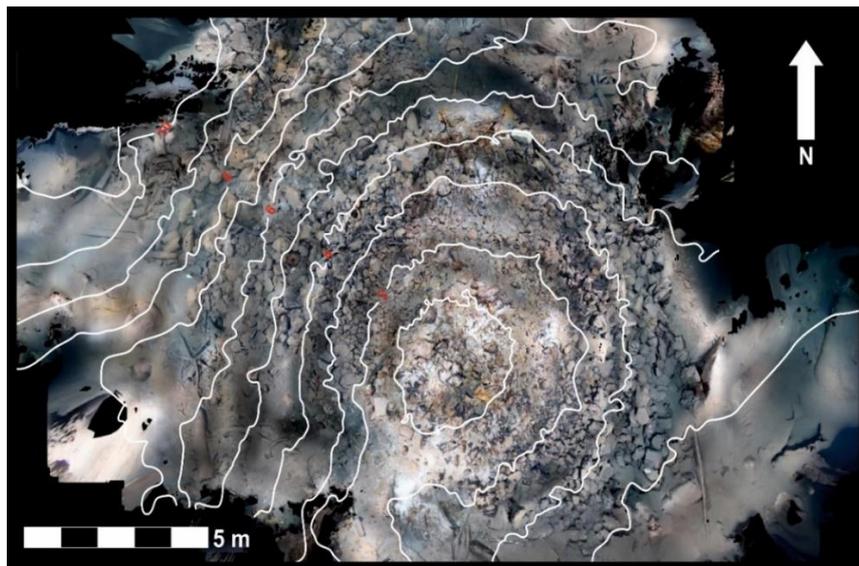
**Tabla 16.** Coordenadas locales y globales obtenidas por el programa fotogramétrico Agisoft Metashape Professional. (Autor; John Kendall).

Además, el software Agisoft Metashape Professional nos permitió también identificar las diferentes curvas de nivel, en este caso la profundidad medida en metros, partiendo de los datos introducidos para el Punto 0 de referencia. Esto aumentó nuestro conocimiento sobre el yacimiento en su totalidad y nos dejó cotejar nuestra medición Z manual con la H obtenida por el programa (Fumás *et al.*, 2022) (Fig.125).



**Figura 125.** Modelo fotogramétrico en planta, en el cual se indican las curvas de nivel en metros de profundidad, sobre cuadrícula escalada y orientada. (Autor; John Kendall).

Con un total de 20 ítems o piezas registradas en el modelo fotogramétrico de cálculo de Kendall, marcados manualmente en el programa, éste nos ofrece automáticamente las coordenadas de cada una de esas piezas cerámicas dispersas en el cono, pudiendo documentarlas y geo posicionarlas (Fig. 126).

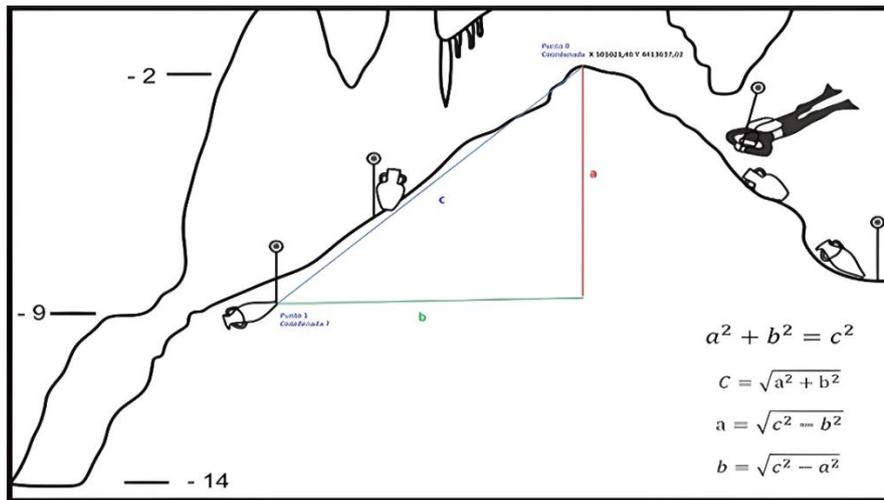


**Figura 126.** Planta del modelo fotogramétrico de Kendall realizado con el software Agisoft Metashape Professional donde se aprecian las curvas de nivel. (Autor; John Kendall y adaptación de Antonio J. Talavera).

#### 7.4.5.2.5. La prospección arqueológica pendular y el registro de piezas cerámicas

Uno de los retos prospectivos en la presente investigación era la realización de una medición manual básica utilizando tan solo el flexómetro, la brújula y el profundímetro como medio alternativo al uso de la fotogrametría cuando las condiciones de poca o nula visibilidad no permitieran el uso de esta técnica. La finalidad era registrar la ubicación y distribución de las piezas arqueológicamente identificables, es decir se trató de localizar el máximo número de restos cerámicos con bordes, asas o perfiles válidos para una posterior clasificación. Además, esta tarea debía servir para intentar cotejar el modelo fotogramétrico, corroborar datos y verificar distancias. La intención final era la realización de una base de datos de toda la documentación obtenida donde se incluyera el registro de todas las piezas actuales y de todas las piezas extraídas en la excavación realizada a finales de los años 90 (Gràcia *et al.*, 2001; Colom y Járrega, 2020).

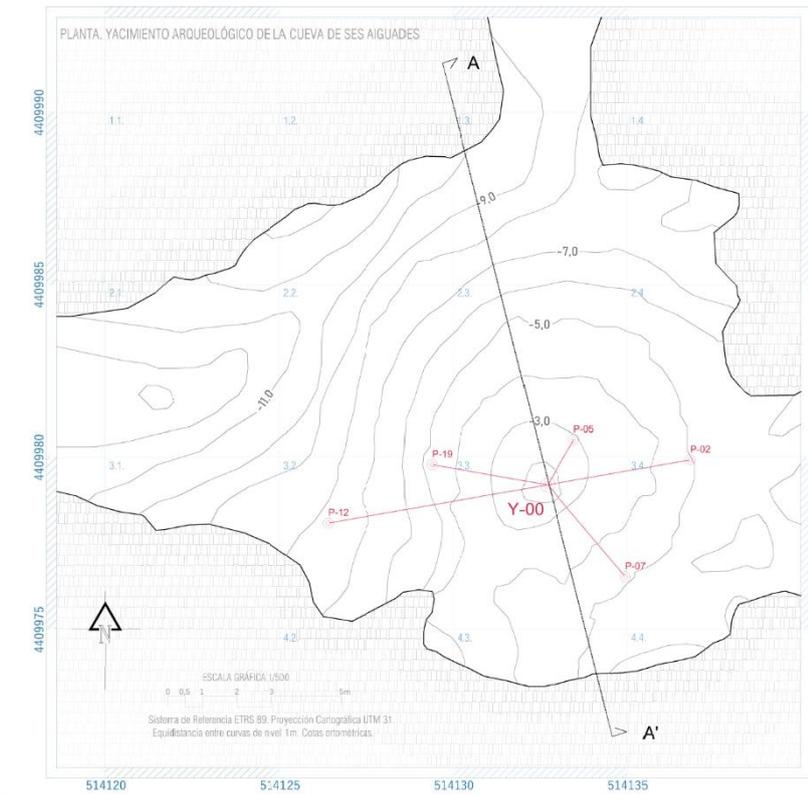
Para conocer exactamente la ubicación de una pieza en cuadrícula georreferenciada debíamos partir de una coordenada segura, y ésta correspondía a la coordenada tomada en la vertical del pozo de entrada a la cavidad (punto 0). Hecho esto, utilizamos de nuevo la medición por eje cartesiano, midiendo la distancia entre el punto 0 hasta la ubicación donde se encontraba la pieza (punto 1) anotando la distancia, el rumbo y la profundidad. Por último, realizamos el cálculo del cuadrado del cateto (b) a través del teorema de Pitágoras, ubicando la pieza respecto a la coordenada de origen (Fig. 127). De este modo, pudimos posicionar un total de 10 piezas. Estas mediciones, tomadas con menor rigurosidad sirvieron posteriormente para guiar a John Kendall en la localización de las piezas sobre el modelo 3D y para crear una primera base de datos sobre la ubicación de cada una de ellas, cotejable con los cálculos realizados por el software Agisoft Metashape Professional. La obtención del cateto b por trigonometría y su validación en la comparación con el modelo fotogramétrico nos reveló la efectividad de la metodología prospectiva usada en términos de geoposicionamiento espacial. Posteriormente, para el cálculo final debimos hacer la conversión de las coordenadas polares a cartesianas.



**Figura 127.** Dibujo representativo de la metodología usada para la geolocalización, posicionamiento y documentación manual de las piezas arqueológicas. (Autor; Antonio J. Talavera).

Otra técnica para conseguir obtener las coordenadas georreferenciadas de los puntos de control hubiera sido el mapeo del hilo con el dispositivo MNEMO, lo cual hubiera hecho necesario la instalación de hilos guía desde el último punto de la poligonal (punto 0), correspondiente a la coordenada tomada sobre la vertical del pozo. De este modo, se hubiera realizado la observación con el aparato MNEMO de las visuales que el hilo describía, obteniendo con ello las coordenadas polares ( $D_g$ ,  $AZ_{\text{magnético}}$ ,  $\Delta Z$ ) de cada punto de control con respecto al punto final de la poligonal o polo de radiación (Fumás, 2022a, 2022b).

Estas coordenadas polares junto con las coordenadas georreferenciadas del polo de radiación se hubieran introducido en una rutina de cálculo de la propia de la topografía clásica y así se habría obtenido las coordenadas georreferenciadas en el sistema ETRS89 proyectadas en la proyección cartográfica UTM 31, de todos y cada uno de los puntos de control, lo cual hubiera permitido realizar la orientación absoluta del modelo y con ello la georreferenciación, es decir, llevar a su verdadera posición en el terreno, el modelo tridimensional del yacimiento (Fig. 128).



**Figura 128.** Planta del yacimiento arqueológico con el detalle del punto 0 y las diferentes radiales medidas desde ese punto de control. (Autor; Pablo Cantuel).

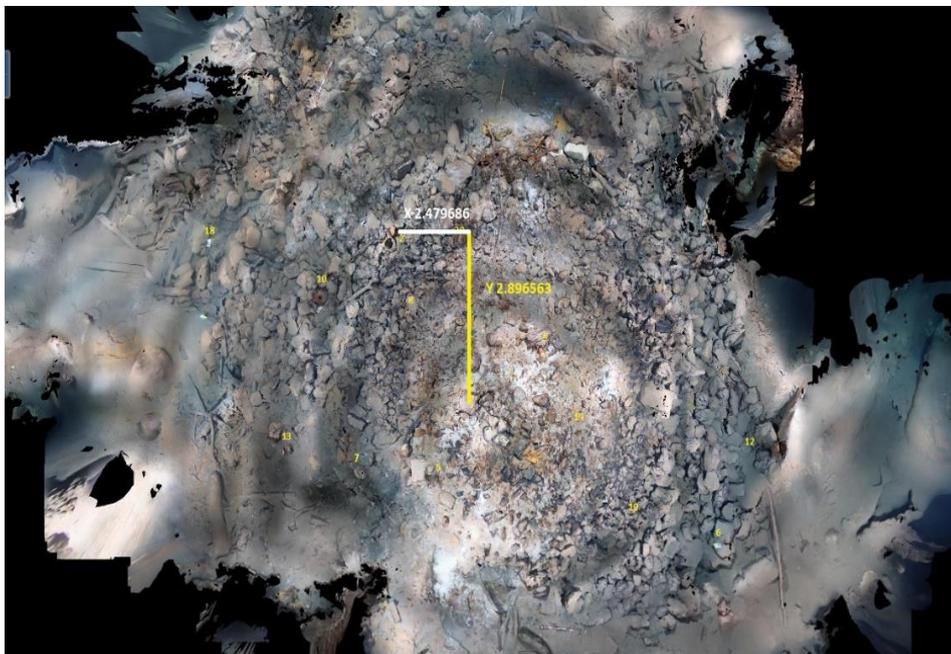
Sin duda, la utilización del MNEMO hubiera sido más rigurosa debido a que la lectura correcta del hilo solo se hubiera logrado si éste estuviera tensado, lo cual habría garantizado que realmente los datos obtenidos por este dispositivo eran verídicos y fiables puesto que el uso del flexómetro tiende a perder la tensión si la longitud entre el punto 0 y el punto X es larga.

La imposibilidad de calibrado del MNEMO mermó las posibilidades de ejercer esta práctica haciendo que nuestro esfuerzo se centrara en la medición manual y el uso de la trigonometría (Tabla 17).

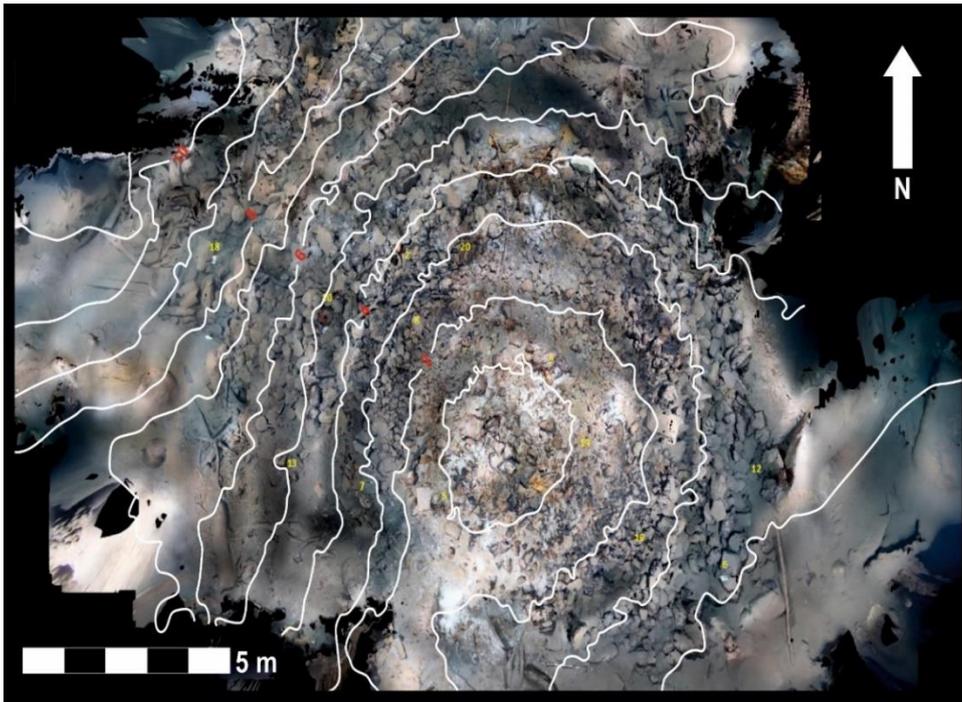
Núm. Pieza	Prof. (m)	Prof. (Cateto A)	Distancia (Hipotenusa)	Azimut	Corrección Azimut	Cálculo (Cateto B)
2	5,1	3,1	5,2	80	260	4,174925149
5	2,8	0,8	1,7	30	210	1,5
7	4,3	2,3	3,7	30	210	2,898275349
8	4,3	2,3	4,2	140	320	3,514256678
10	5,6	3,6	5,6	90	270	4,289522118
12	6,1	4,1	7,6	260	80	6,399218702
14	4	2	3,1	270	90	2,368543856
15	2,9	0,9	1,7	160	340	1,44222051
19	4,5	2,5	4,2	280	100	3,374907406
20	4,7	2,7	5,1	170	350	4,326661531

**Tabla 17.** Cálculo trigonométrico obtenido para conocer la longitud en metros del cateto b necesario para el geoposicionamiento planimétrico de las piezas sumergidas del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; elaboración propia.

Partiendo del punto 0 de referencia y obtenidos el resto de los puntos (X, Y, Z), correspondientes a la dispersión de la cerámica identificable en la inmersión quedaba por comprobar sobre si los datos eran similares con los obtenidos por el modelo fotogramétrico (Figs. 129 y 130).



**Figura 129.** Gracias al conocimiento de la ubicación exacta de la coordenada correspondiente al punto 0 podíamos conocer la coordenada X, Y y Z de cada una de las piezas registradas manualmente del yacimiento (Autor; John Kendall).



**Figura 130.** Modelo fotogramétrico completo del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades en Alcanada donde se aprecia las curvas de nivel y la numeración y ubicación de las diferentes piezas cerámicas documentadas. (Autor; John Kendall).

#### 7.4.5.2.6. Comparación de los resultados entre ambas técnicas

Realmente, al tratar de cotejar y comparar los resultados entre los datos y coordenadas obtenidas por el programa fotogramétrico y por los cálculos trigonométricos resultantes de la medición manual de las diez piezas a estudio, es cuando debemos ser laxos y comprender en primer lugar que la técnica fotogramétrica siempre será más exacta, debido a los algoritmos intrínsecos en el programa permiten un cálculo infinitesimal de los datos obtenidos por el solapamiento de las fotografías.

El método manual debemos contextualizarlo dentro de una preferencia puramente económica puesto que no tiene ninguna ventaja añadida. La fotogrametría es más rápida, más eficaz y segura, y además disminuye el tiempo de inmersión y aumenta exponencialmente las probabilidades de éxito.

Lógicamente la necesidad de buscar un método alternativo más económico hizo que el proyecto apostara por la realización de las mediciones manuales sabiendo

que éstas se podrían cotejar con un método empírico real y efectivo como era la fotogrametría.

En nuestro caso, los resultados fueron excepcionalmente buenos puesto que, tras realizar las mediciones, ejecutar la fórmula trigonométrica de Pitágoras para la obtención del cateto B y cotejar los resultados pudimos comprobar como el porcentaje de error o diferencia entre ambas lecturas era mínimo. A modo de ejemplo, si comprobamos en un software como ARCGIS o QGIS la distancia entre las coordenadas UTM 31N, X: 514132.708, Y: 4409979.195, H: -0.338, correspondiente al punto 0 hasta la coordenada UTM 31N, X: 514130.228, Y: 4409982.092, H: -5.619 correspondiente a la pieza cerámica núm. 2, la distancia entre ambas es de 3.815 metros y si miramos lo que midió el cateto B en las mediciones manuales veremos que fueron 4.1749 metros. Siempre en un contexto planimétrico sin tener en cuenta la H o la Z.

Si ponemos otro ejemplo y comprobamos la distancia de nuevo en un software SIG desde la coordenada UTM 31N, X: 514132.708, Y: 4409979.195, H: -0.338 (punto 0) hasta la coordenada UTM 31N, X: 514138.881, Y: 4409979.238, H: -5.553, correspondiente a la pieza cerámica 12 (la más alejada del punto 0 de todas) nos da una distancia de 6.18 metros y de nuevo si miramos la tabla de medición manual veremos que la distancia del cateto B del punto 0 hasta la pieza es de 6.39921 metros.

Así, si queremos saber el porcentaje de error de la medición manual respecto a la medición fotogramétrica tan solo tendremos que hacer la siguiente ecuación;  $(6.39921 - 6.18) \times 100/10$  y comprobaremos que el margen de error para esta medición es del 2.1%. Desde nuestro punto de vista, y sin ser una técnica topográfica rigurosa, éste es un error completamente asumible si entendemos la gran dificultad técnica en la que nos desenvolvemos al tratar de realizar mediciones subacuáticas en ambientes confinados con poca visibilidad, sabiendo que la propia tensión del flexómetro o que un mínimo error en el posicionamiento del punto 0 o punto de referencia puede generar un error acumulativo en las mediciones.

#### 7.4.5.3. La documentación fotográfica

Las campañas arqueológicas realizadas tuvieron el permiso de la Conselleria de Patrimoni de Mallorca, si bien dicha autorización no comportaba la posibilidad de extraer piezas ni llevar a cabo ningún trabajo de remoción del terreno que pudiera ayudarnos a realizar un posterior análisis de muestras, ya fueran arqueológicas o paleontológicas. Por lo tanto, el registro documental se tuvo que realizar a través de la fotografía y el dibujo arqueológico. Estas fueron herramientas fundamentales a la hora de realizar cualquier consulta con especialistas en cada una de las materias mencionadas (Bagot, 1999; Moreno y Quixal, 2013; González, 2014).

La cova de la Font de Ses Aiguades, no sólo tiene un enorme potencial arqueológico sino también paleontológico, dada la existencia de huesos de *Myotragus balearicus*, lo cual nos obligó a generar una correcta prospección y documentación del sitio para complementar la bibliografía previa (Fig. 131).

Concretamente, el ejemplar de *Myotragus balearicus* encontrada en el interior de la cueva fue estudiado ya en la tesis doctoral de Gràcia (2015), quien depositó el material fotográfico en la colección del Museo de la Naturaleza de las Islas Baleares, con el número de colección MNIB 64728 (Gràcia *et al.*, 2001; Gràcia, 2015).

Su presencia, además del evidente interés paleontológico, nos dio la prueba de que la cavidad estuvo abierta naturalmente miles de años antes de la llegada de los primeros grupos humanos a Mallorca y no solo como resultado de una acción antrópica relacionada con la búsqueda de agua (Guerrero, 1996).

Por otro lado, el dibujo arqueológico nos permitió distinguir mejor la naturaleza anatómica y ósea del animal y también facilitó la consulta a paleontólogos y zooarqueólogos (Vicente, 2005). De esta manera, la información obtenida podía permitirnos revalorizar el sitio y comprender su importancia (Fig. 131).



**Figura 131.** Restos paleontológicos sumergidos en la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Restos óseos de *Myotragus balearicus* en la galería sumergida del mismo nombre en la cova de la Font de Ses Aiguades. (Foto; Miguel A. Perelló). **2.** Dibujo arqueológico mediante la vectorización de la imagen. (Realizado por Gabriel Graff para el Proyecto IASCM 2019).

#### 7.4.5.4. Aplicación de ciencias auxiliares a la prospección arqueológica

##### 7.4.5.4.1. Aplicación de la colorimetría en el estudio arqueológico

Otra de las técnicas utilizadas en el presente proyecto, para el conocimiento de la cronología y tipología cerámica, es la colorimetría, utilizada para la identificación de posibles marcas o tituli pictus en la cerámica sumergida remanente. A través de la extensión DStretch<sup>94</sup> del software Image-J, esta herramienta nos fue de mucha utilidad para la identificación y documentación de marcas a través del análisis de imágenes multiespectrales (Martínez, 2010) (Fig. 132.1).

Siguiendo con la metodología común en este tipo de estudios, el funcionamiento del programa responde básicamente a la descomposición en bandas RGB de la imagen original y en la aplicación de una serie de operaciones matemáticas estadísticas (algoritmo de descorrelación) sobre la información cuantitativa contenida en ella. El resultado es la obtención de una segunda imagen en falso

<sup>94</sup> <https://www.dstretch.com/>

color que posibilita la visualización de motivos anteriormente difíciles de percibir por el ojo humano, así como la distinción entre diferentes superposiciones y clases de pigmentos utilizados en nuestro objeto de estudio (Martínez, 2010; Selmo *et al.*, 2017).

Aunque el cálculo automático del algoritmo de descorrelación en la imagen se ejecuta al seleccionar los comandos de espacio-color, a través de los cuales el programa calcula la matriz de covarianza (o correlación) de los colores. Si seleccionamos un área determinada, el cómputo de píxeles se realiza sobre la misma, aunque la transformación se aplica a toda la imagen, pudiendo excluir así la información confusa. Entre las opciones de espacio-color se encuentran los estándar RGB y LAB, así como otras variaciones de los espacios YUV ó LAB (YDS, YBR, YBK, LDS, LRE). Cada uno opera realizando diferentes tonalidades y se pueden agrupar, grosso modo, en aquellos que funcionan bien con los amarillos, los que ofrecen rojos intensos y los que se aplican en el tratamiento de negros y azulados. Además, este *plug-in* permite crear espacios de color definidos por el usuario y controlar el contraste entre las tonalidades resultantes (Martínez, 2010; Acevedo y Franco, 2012; Le Quellec *et al.*, 2013) (Fig. 132.2).

La imagen original se ve modificada en función de la distribución de sus colores, del espacio-color seleccionado y si activamos o no la opción de “normalización” de los colores correlacionados, que consiste en una operación inversa para “mapear” de nuevo el color hacia una aproximación de los valores originales. Estas transformaciones se pueden guardar en un archivo de texto para su posterior aplicación en otras imágenes y crear así flujos de trabajo mecanizados (Fig. 132.3).

En el caso concreto de las pigmentaciones, una de las ventajas que ofrece el *plug-in* es la posibilidad de diferenciar los tipos presentes en una pieza a través de la variación en la intensidad y tonalidad, y dependiendo del estado de degradación de nuestra área de estudio podemos distinguir las diferentes técnicas de ejecución empleadas (Martínez, 2010).

En nuestro caso, el objeto número 7 a estudio colorimétrico, se trataba de un ánfora Dressel 2-4 Tarraconense que contaba con un *titulus pictus* muy particular. Al disponer solo de una fotografía de este objeto, solo se pudo leer con claridad

parte de la inscripción, siendo necesario utilizar todos los medios a nuestro alcance para extraer la máxima información.

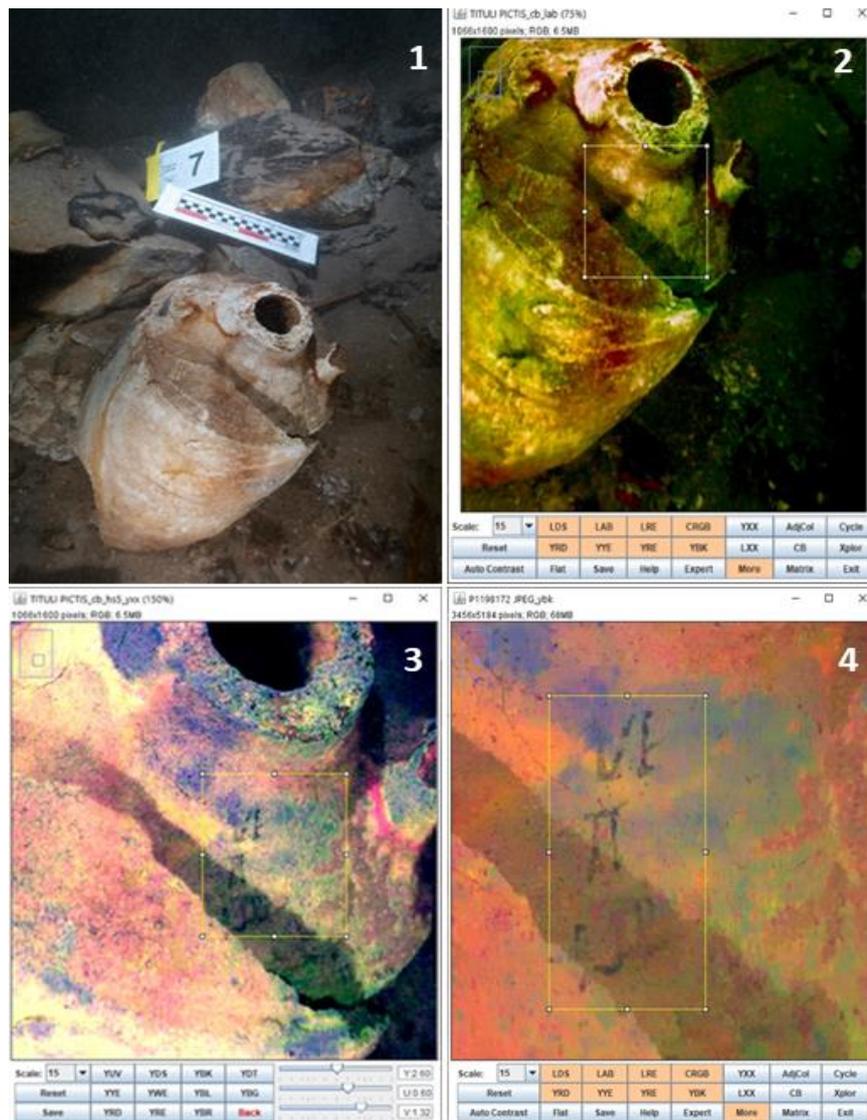
En una primera línea de observación se puede apreciar la inscripción VE (quizá VF), y en la segunda se puede observar claramente otras dos letras, RT. El problema viene final de la inscripción donde la calidad de la fotografía no es suficiente para leer con claridad. Una posibilidad que parece intuirse es XIB, IB o IR (Fig. 132.4).

Desconocemos el significado de dicha inscripción, la cual posiblemente podría darnos información sobre la carga que transportó y/o incluso marcar el origen del envase. La presencia de depósitos de Muschelkalk<sup>95</sup> en el río Turia, nos hace proponer una posible hipótesis para la primera parte del titulus, VE. Quizá dichas letras hagan referencia a *Valentia Edetanorum* (actual ciudad de Valencia). Enric Colom entiende esta inscripción como VE (tus) A(mineum).

Así, el estudio colorimétrico permitió tanto la propia valoración como la difusión de las nuevas imágenes obtenidas, permitiendo crear sinergias con expertos en la materia de ámbito nacional e internacional. Por todo ello, consideramos la extensión DStretch de Image-J una herramienta muy versátil en el análisis y preservación de la información contenida en los restos cerámicos, lo cual supone un gran apoyo en los trabajos de campo y contribuye al abaratamiento del proceso de documentación (Martínez, 2010).

---

<sup>95</sup> Los depósitos Muschelkalk son unos sedimentos de composición carbonática de edad triásica, descritos ya por el geólogo alemán Friedrich August von Alberti en el año 1834 en la cuenca germánica, aunque también se pueden encontrar en muchas zonas del continente europeo.



**Figura 132.** Datos extraídos mediante el software de aplicación de colorimetría en el objeto cerámico núm. 7 del yacimiento arqueológico de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Parte superior del cuerpo de un ánfora (núm.7) donde se aprecia parte del *titulus pictus* en el que se puede observar VF o quizá VE y posiblemente en la parte inferior RT. (Foto; Miguel Ángel Perelló). **2.** Aplicación de la primera descorrelación donde se aprecia las marcas de rozamiento sufridas por la pieza. Fuente; elaboración propia. **3.** La aplicación de contrastes en los colores permite la mejor visualización de marcas pictográficas en la cerámica. Fuente; elaboración propia. **4.** El programa Image J permite la ampliación de las imágenes y el empleo de diferentes filtros de espacio-color, con lo cual se consigue visualizar mejor posibles inscripciones ocultas. Fuente; elaboración propia.

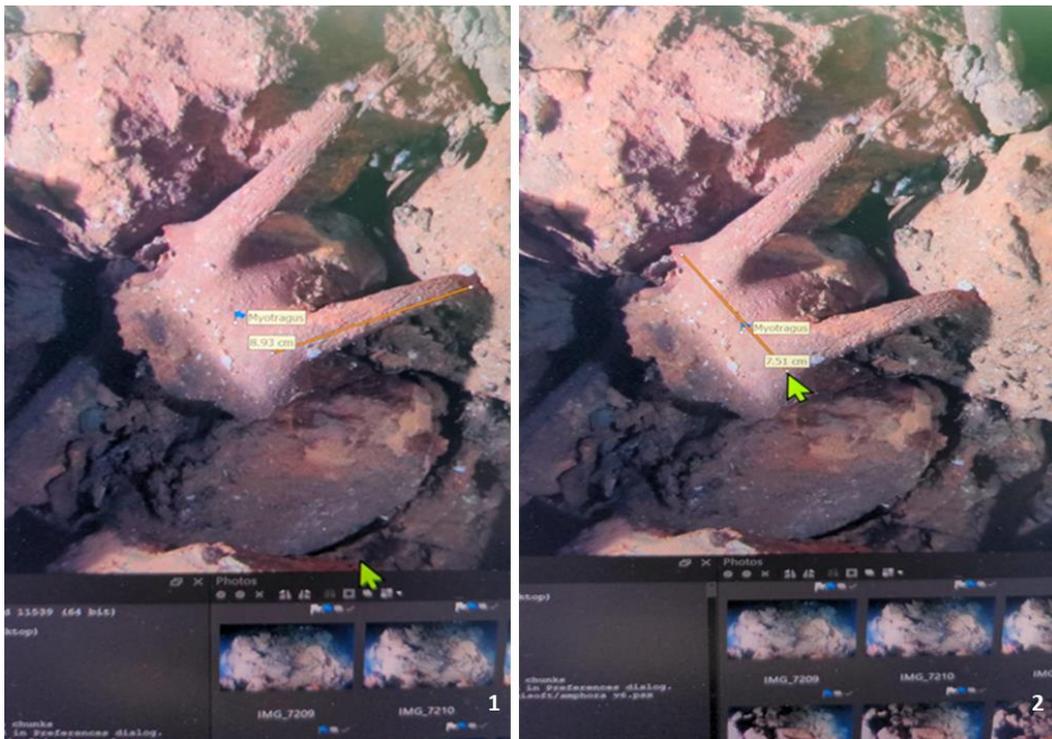
#### 7.4.5.4.2. Resultados del estudio paleontológico de la cavidad

Durante las tareas de fotogrametría, en la campaña del año 2020, y en la parte más angosta de la base del cono de depósito de escombros, el técnico en fotogrametría John Kendall encontró un cráneo que podría ser de *Myotragus balearicus*, en la coordenada UTM 31N, X: 514128.558, Y: 4409983.050, H: -8.077.



**Figura 133.** Restos paleontológicos en la base del cono del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Cráneo de un caprido que podría pertenecer a los restos óseos del *Myotragus balearicus*. Campaña del año 2020. (Foto; John Kendall). **2.** Detalle de la ubicación del cráneo en la falda inferior del cono de escombros del yacimiento de Ses Aiguades. (Foto; John Kendall).

Gracias a las técnicas de geoposicionamiento del modelo fotogramétrico del yacimiento pudimos conocer la ubicación concreta del cráneo en la pirámide de depósito de escombros. Esto es debido a que el software Agisoft Metashape Professional era capaz de reconocer la posición de la fotografía donde aparecía el cráneo respecto al modelo general (Abdelaziz y Elsayed, 2019). Además, el software podía medir el cráneo en su parte frontal y temporal, consiguiendo incluso, en nuestro caso, medir en una captura de imagen los cuernos del caprino desde la parte distal hasta la proximal. Desafortunadamente, estos datos no fueron lo suficientemente concluyentes como para identificar la especie del individuo a estudio, por lo que no solo no pudimos relacionar el cráneo con los huesos de *Myotragus balearicus* encontrados en campañas anteriores, sino que ni siquiera se pudo asegurar que el cráneo pertenezca a la misma especie (Figs. 134.1 y 134.2).



**Figura 134.** Detalle de los restos óseos sumergidos en el yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Detalle del cuerno del cráneo medido por el software Agisoft Metashape Professional. (Autor; John Kendall). **2.** El programa fotogramétrico Agisoft Metashape Professional es capaz de tomar medidas exactas de cualquier elemento gracias al escalado previo del modelo. (Autor; John Kendall).

#### 7.4.5.4.3. Resultados del estudio analítico del agua

Dentro del estudio prospectivo general y bajo las premisas de control de seguridad y salud de los espeleo-buceadores, debíamos aumentar nuestros esfuerzos en la contextualización histórica, no solo de los restos hallados en la cavidad sino de la propia agua, ya que sin duda durante siglos fue el bien más preciado de la cueva. Para ello se optó por la realización de un estudio químico, un estudio analítico y un estudio biológico del agua con el fin de conocer la importancia del pozo de la Font de Ses Aiguades desde la antigüedad.

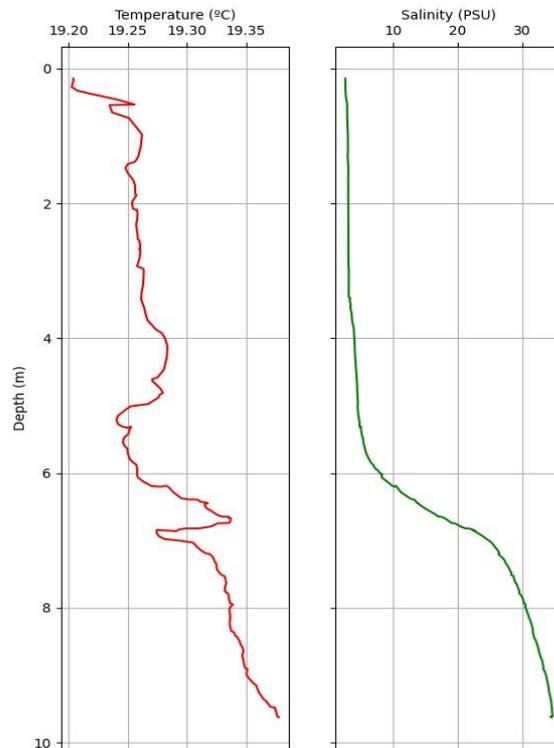
Durante años se han generado una serie de hipótesis sobre el posible uso del agua de esta cavidad, siendo algunas de ellas esgrimidas y defendidas meticulosamente en artículos y publicaciones científicas. Algunas de estas hipótesis defienden el uso de la cavidad como punto de abastecimiento de agua potable (Gràcia *et al.*, 2001), otras como uso del agua para funciones denominadas medicinales (Espinosa, 2002; Colom y Járrega, 2020), debido a sus niveles de cloruros óptimos para dolencias gástricas y, por último, como agua sagrada de una posible cueva santuario, en la cual se arrojaban restos cerámicos como ofrendas de agradecimiento por los beneficios obtenidos (Colom y Járrega, 2020).

Todas estas hipótesis solo pueden ser contrastadas y defendidas si conocemos más sobre los aspectos analíticos del agua de la cueva, siendo ésta una de las prioridades del proyecto desde el comienzo. Es por esta razón por lo que se decidió realizar una lectura CTD (Rana y Navy, 2008; Arfib *et al.*, 2016), una analítica química y finalmente un análisis biológico para intentar definir y corroborar alguna de las hipótesis mencionadas anteriormente (Gráfico 8).

##### 7.4.5.4.3.1. Resultados del análisis del agua con sonda CDT

Dentro de los parámetros de control sobre seguridad e higiene de los espeleo-buceadores, los datos de temperatura, salinidad y profundidad se midieron mediante una sonda oceanográfica XR-420 CTD del IMEDEA. La sonda fue

transportada por un espeleo-buceador que avanzó en vertical muy lentamente para poder tener un registro completo y fiable desde el acceso vertical del pozo hasta el final de la Galería dels Myotragus (Gráfico 11).



**Gráfico 11.** Valores obtenidos de la columna de agua medidos con CTD donde se aprecia el aumento de temperatura y salinidad a medida que ganamos profundidad. Fuente; IMEDEA. UiB para Proyecto IASCM.

La lectura obtenida por el CTD y reflejada en la gráfica anterior nos señaló una temperatura constante del agua de la cavidad de 19°, aunque a medida que aumentaba la profundidad, y distorsionada por la haloclina producida por el cambio del agua dulce al agua salada a partir de los - 6 metros, la temperatura aumentaba ligeramente. En cambio, la salinidad, medida en PSU (unidades prácticas de salinidad) o también gramos por litro, a esa misma profundidad se disparaba hasta niveles porcentuales de agua marina por lo que el dispositivo

claramente nos indicaba una intrusión freática de agua salada que permanece en la zona más profunda de la columna de agua de la cavidad.

La concentración de cloruro de sodio (NaCl) en la capa más profunda de agua de la cueva nos indicaba valores parecidos a los mares y océanos, siendo ésta muy elevada entre 33 y 37 g/L mientras que en la capa superficial los valores eran casi tan bajos como el del agua dulce (menor de 5 g/L). De este modo, y sabiendo que por regla general el contenido de sal en agua potable es, por definición, menor a 0,05 %, la del agua salobre o salina con valores porcentuales entre el 3 al 5 % de sal en volumen y la de la salmuera superior al 5%, las características químicas del agua de la cova de la Font de Ses Aiguades eran una incógnita que debía ser resuelta por una analítica (Tabla 18).

	Valores generales de la salinidad del agua			
Valores	Agua dulce	Agua salobre	Agua del mar	Salmuera
%	< 0.05	0.05 - 3	3 - 5	> 5
gr/L	< 0.5	0.5 - 30	30 - 50	> 50

**Tabla 18.** Datos orientativos de los valores generales establecidos para los distintos tipos de agua. Fuente; (Mantyla, 1986).

#### 7.4.5.4.3.2. Resultados del estudio químico del agua

Tras ser extraída una muestra de la parte superior de la columna de agua en la vertical del pozo, ésta se llevó a analizar por el equipo de biólogos formado por Luis Auque de la Universidad de Zaragoza (UZ) y Ana Entrena de la Universidad de las Illas Balears (UIB). Siendo los valores finales los reflejados en la siguiente tabla (Tabla 19).

Temp	Alc (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Alc (mg/L HCO <sub>3</sub> )	Cl (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Si (mg/L)	Sr (mg/L)
19,2	420,00	512,40	1530,00	287,80	180,90	117,60	811,10	32,82	4,107	0,918

**Tabla 19.** Valores obtenidos en el laboratorio tras el análisis químico del agua de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; UZ y UiB.

El Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, recoge los parámetros límite que debe presentar un agua para clasificarse como apta para el consumo humano. Los parámetros analizados en las muestras de aguas de la cova de la Font de Ses Aiguades comparados con los datos recogidos en el Real Decreto aparecen en la siguiente tabla (Tabla 20):

	Parámetros indicadores	Agua Font de Ses Aigüades
SO <sub>4</sub> (mg/L)	250	287.8
Na (mg/L)	200	811.1
Cl (mg/L)	250	1530.0

**Tabla 20.** Comparación de los diferentes valores entre los parámetros estándares y los obtenidos tras el análisis del agua de la cavidad. Fuente; elaboración propia.

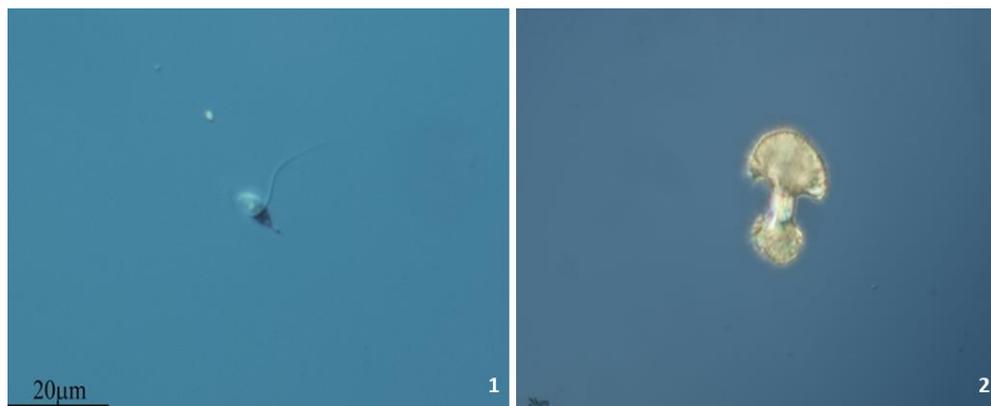
La comparación de los parámetros analizados indica que los valores del agua de la cova de la Font de Ses Aiguades sobrepasan en todos los casos los límites recogidos en la normativa. En el caso del sulfato solo sobrepasa el límite establecido por 40 mg/L, mientras que el porcentaje de sodio presenta valores 4 veces superiores y el cloruro hasta 6 veces más.

En conclusión, las aguas recogidas en la cueva de la Font de Ses Aiguades rebasan los límites de los parámetros comparados con los indicados en el Real Decreto, esto es debido a que el agua muestreada es una mezcla de agua salada con agua meteórica (dulce) y por ello queda lejos de los valores aceptables para el uso de consumo humano.

#### 7.4.5.4.3.3 *El análisis biológico del agua*

La misma muestra de agua también fue enviada hasta los laboratorios del IES Escultor Daniel en Logroño para ser estudiada por el catedrático en biología, Antonio Guillén Oterino, el cual analizó la muestra con microscopía óptica empleando diferentes técnicas de iluminación a x100 x200 x400 y x1000 aumentos (Fig. 135.1).

Para el estudio se utilizaron dos equipos microscópicos, un Leica DMRB y un Leica DMLB. En el volumen total de la muestra, aproximadamente 250 ml, no se apreciaba ni partículas en suspensión ni tampoco sedimentos. En una primera observación con microscopía de contraste de interferencia no se arrojó ningún resultado, ni permitió ver ninguna partícula, organismo o resto sedimentario. Posteriormente se decantó y centrifugó en varios tubos Falcon y no se apreció a simple vista ningún resto de sedimentación. Con una pipeta Pasteur se recogió un pequeño volumen de agua del cono de sedimentación de cada uno de los tubos y se montó directamente sobre un portaobjetos para proceder a una segunda observación. Aunque con una densidad muy baja se pudo reconocer algunas formas vivas flageladas del euglénido Bodo. Se trata de un protista de apenas 6  $\mu\text{m}$  de longitud incluido en el dominio excavata de hábitos fagotróficos que se alimenta fundamentalmente de bacterias (Fig. 135.2).



**Figura 135.** Bacterias presentes en la muestra de agua recogida de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Imagen microscópica del agua de Ses Aiguades donde aparecen formas vivas flageladas del euglénido Bodo. (Autor; Antonio Guillén Oterino) **2.** En la muestra del análisis biológico del agua de Ses Aiguades también aparecen algunas formas bacterianas cocoides muy escasas. (Autor; Antonio Guillén Oterino).

Su densidad en la muestra era mínima y su presencia testimonial. Se reconocieron también en el sedimento diferentes formas bacterianas, fundamentalmente bacilos con dos morfologías bien diferenciadas: unos de cuerpo fino y flexuoso que se desarrollan en grupos y que pueden alcanzar hasta las 20  $\mu\text{m}$  de longitud, y otras formas rectas que se presentan de forma aislada, y que corresponden a bacilos algo más gruesos, y de menor longitud, 8-10  $\mu\text{m}$ . La densidad de estas formas

bacterianas también era insignificante y debería volver a valorarse mediante cultivo en muestras frescas.

Se observaron asimismo algunas formas bacterianas cocoides muy escasas. No se encontraron otras formas vivas ni restos de ellas como frústulos de diatomeas<sup>96</sup>, evidencias de la presencia de otros protistas<sup>97</sup>, tejidos algales, esporas u otras formas de resistencia, por lo que sería necesario realizar en un futuro un muestreo específico para la búsqueda de organismos microscópicos. En el sobrenadante del agua centrifugada se apreciaron algunas irisaciones que observadas al microscopio con las técnicas de contraste de interferencia y polarización se identificaron como cristalizaciones minerales por sobresaturación del medio (quizá de carbonato cálcico o magnésico) y que daban lugar a unas singulares estructuras en forma de “coliflor”.

Se procedió a la realización de un estudio de algunos parámetros fisicoquímicos básicos mediante el análisis en un fotómetro multiparamétrico<sup>98</sup> con los siguientes valores (Tabla 21).

Cova de la Font de Ses Aiguades	Valores (Fotómetro Multiparamétrico HANNA HI83306)
pH	8.3
Fosfato P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03 mg/l
Fósforo libre	0.01 mg/l
Sílice SiO <sub>2</sub>	0.16 mg/l
Nitratos NO <sub>3</sub>	12.6 mg/l

**Tabla 21.** Datos físico- químicos de la muestra de agua analizada por el Dr. Guillen para el Proyecto IASCM 2020.

<sup>96</sup> Las diatomeas son un grupo de algas unicelulares que constituyen uno de los tipos más comunes de fitoplancton. Contiene actualmente unas 20.000 especies vivas, las cuales son importantes productores dentro de la cadena alimenticia.

<sup>97</sup> Protista comprende al conjunto de organismos eucariotas, que no son animales, plantas u hongos. En la clasificación científica de los seres vivos los protistas son asignados al Reino Protista que es un taxón cajón de sastre, en progresivo desuso.

<sup>98</sup> El fotómetro multiparamétrico es un dispositivo móvil para el análisis de líquidos. Con el fotómetro multiparamétrico puede realizar diferentes mediciones. Por ejemplo, con un fotómetro multiparamétrico se puede determinar la alcalinidad, el cloro (libre y total), el ácido cianúrico o el pH.

En conclusión, el dato que más llamó la atención a Guillén es la falta de microorganismos en la muestra analizada, sin la aparición de diatomeas ni restos orgánicos de ningún tipo por lo que el agua se podía considerar potable, ligeramente salobre y biológicamente pura, incluso más que ciertos manantiales de alta montaña. A falta de un estudio con muestras de sedimento para la obtención de más microorganismos la calidad del agua biológicamente hablando era excelente.



# CAPÍTULO 8

# DISCUSIÓN

*Saber mucho no es lo mismo que ser inteligente. La inteligencia no es sólo información, sino también juicio, la manera en que se recoge y maneja la información.*

*Carl Sagan (1934-1996)*

## **8. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

Los resultados obtenidos en las diferentes cavidades sumergidas prospectadas nos muestran una gran heterogeneidad de datos, los cuales solo pueden ser interpretados a través de la contextualización de éstos. Es decir, la morfología de la cueva, las condiciones intrínsecas propias y los objetivos marcados variaran el comportamiento de los datos obtenidos por los dispositivos utilizados. Esta premisa es algo que debemos asumir y comprender a la hora de intentar generar un protocolo de actuación concreto en lo que respecta a la prospección arqueológica subacuática en cavidades sumergidas.

Es por esto por lo que, aunque debamos desarrollar o modificar nuestro método dependiendo de las características y de las metas que se pretendan conseguir, la presente investigación nos ha mostrado que por muy diversa que sea la metodología por utilizar, el protocolo de actuación es muy similar, y que éste deberá ser adaptado al proyecto y a los objetivos concretos del mismo.

Así mismo, la experiencia obtenida durante las diferentes campañas de prospección nos ha indicado que un uso incorrecto de los medios técnicos utilizados, sobre todo en lo que respecta a la localización y posterior geo posición del objeto arqueológico a estudio, puede condicionar e incluso inutilizar las conclusiones obtenidas si la lectura del dispositivo es errónea. Así, a continuación, definiremos las líneas de actuación más importantes desarrolladas durante nuestra investigación y analizaremos cómo evitar errores en la ejecución de estos aparatos de medición.

### **8.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS HISTÓRICOS Y METODOLÓGICOS POR CAVIDADES**

La aportación de los resultados obtenidos en las campañas de prospección en las diferentes cuevas sumergidas generó no solo una gran cantidad de datos, sino que fomentaron la discusión metodológica y la discusión histórica en el momento de interpretarlos. Es decir que, las técnicas empleadas en la prospección tuvieron un

marcado “ensayo y error” que fue mejorando la metodología de trabajo, desde la más básica, utilizada en las cuevas del Garraf, hasta la más compleja realizada en la última campaña en las cuevas de Mallorca (Tabla 22).

	GARRAF	GEGANT	FALCONERA	SANTANYÍ	GENOVESA	SES AIGUADES	SA GLEDA
<b>TOPOGRAFIA MANUAL</b>							
- Levantamiento topográfico previo	X	X	X	X	X	X	X
- Triangulación		X		X	X	X	X
- Eje cartesiano		X		X	X	X	X
- Cuadrícula individual		X					
- Mapeo por hilo MNEMO			X		X	X	X
- Ecosonda							X
- A.U.V.			X				
- ENC2 SEACRAFT					X		X
- Poligonal terrestre			X				
- GPS diferencial					X	X	X
- Estación total					X	X	X
<b>PROSPECCIÓN VISUAL</b>							
- Lineal primaria	X	X	X	X	X	X	X
- Lineal secundaria			X	X	X	X	X
- Lineal terciaria					X		X
- Pendular				X		X	X
- Medición potencia sedimentaria	X	X	X	X	X	X	X
- Succión portátil sedimento			X				
<b>RADIOLOCALIZACIÓN</b>							
- PINGER						X	X
- SUMMER					X		X
<b>REGISTRO GRÁFICO</b>							
- Croquis y balizas escaladas					X	X	X
- Fotografía	X	X	X	X	X	X	X
- Fotogrametría		X			X	X	
- Dibujo arqueológico ordenador						X	
- Colorimetría						X	
- Filmación Vídeo	X	X	X	X	X	X	X
- Sistemas de Información Geográfica (SIG)			X			X	X
- DRON		X	X			X	X
<b>ANÁLISIS</b>							
- Registro core estratigráfico		X	X	X	X	X	X
- C.T.D.					X	X	X
- Hidro-geoquímico agua						X	
- Biológico agua						X	
<b>CONTEXTUALIZACIÓN DEL PAISAJE</b>							
- Consulta fuentes bibliográficas			X		X	X	X
- Consulta fuentes geográficas (IGN)					X	X	X

**Tabla 22.** Técnicas y metodologías de prospección utilizadas en cada una de las cavidades estudiadas en la presente tesis. Fuente; elaboración propia.

Pero, por otro lado, tratando de alcanzar los objetivos metodológicos de la presente tesis, también se generaron diferentes hipótesis históricas y arqueológicas que surgían al completar el estudio de la cavidad mediante la consulta de documentación escrita, los archivos, las fuentes orales, el análisis geoespacial del área de intervención y las ciencias auxiliares relacionadas con la prospección arqueológica.

### **8.1.1. Las cuevas del Garraf**

#### *8.1.1.1. Interpretación metodológica*

Las tres cuevas semisumergidas donde centramos nuestro estudio fueron: la cova de Xarxa, la cova del Congre y la cova del Pebre. En todas ellas, se pretendía realizar un profundo estudio arqueológico, aunque finalmente tan solo pudieron ser prospectadas superficialmente.

Por otro lado, debemos ser conscientes que todas estas cuevas de escasa longitud pueden tener una prolongación hacía el interior de la montaña, aunque esto solo lo sabríamos despedregando el vestíbulo de rocas y piedras que cubren toda la superficie de la entrada.

Desafortunadamente, la exposición al fuerte oleaje y el movimiento de sedimento continuo provoca que estas cavernas semisumergidas queden estériles de cualquier remanente arqueológico, al menos por lo que se refiere a restos antiguos. Y aunque los objetivos marcados en la prospección de estas cuevas consistían en la verificación de la existencia de estratigrafía arqueológica, el suelo rocoso sumergido imposibilitaba la más mínima intervención en este sentido, haciendo inviable la continuación investigadora en estas cavidades.

#### *8.1.1.2. Interpretación histórica y arqueológica*

La gran cantidad de cavernas semisumergidas con entradas abiertas en la escarpada costa del Garraf alimenta el imaginario sobre su utilización como cuevas refugio, o como puntos de abastecimiento de agua dulce, al encontrarse cerca de la línea de costa a comienzos del Holoceno (Checa *et al.*, 1988). La existencia de indicadores arqueológicos en las muestras estratigráficas extraídas en los sondeos hubiera permitido realizar unas primeras inferencias sobre la naturaleza de los datos a nivel sedimentológico, cronológico y de otra índole. Tan solo en un futuro y mediante utensilios hidráulicos de percusión, podremos alcanzar las metas propuestas y extraer muestras del subsuelo para estudiar su

composición, tratando de responder a todas las preguntas que se han ido planteando en la investigación.

## **8.1.2. La cova del Gegant**

### *8.1.2.1. Interpretación metodológica*

La cova del Gegant, al igual que las cuevas del Garraf, no puede considerarse una cavidad sumergida, pero sí una cueva litoral tan próxima al mar que debía ser considerada en su estudio arqueológico submarino (Grosso *et al.*, 2019). En realidad, el estudio metodológico realizado en la zona sumergida de la cueva se centró en la mejora de las técnicas de trabajo de prospección visual, el geoposicionamiento correcto del área de trabajo subacuático a través de métodos manuales estándar como; la triangulación, el eje cartesiano y la cuadrícula individual. Por último, se registró documentalmente tanto la parte sumergida como la zona aérea periférica a través de imágenes de dron, con la intención de completar el trabajo arqueológico terrestre en curso (Sanz, Daura y Subirà, 2005; J. Daura *et al.*, 2010; Rodríguez *et al.*, 2011; Daura y Sanz, 2014; Daura *et al.*, 2017, 2021). Además, se trató de realizar un modelo 3D tanto de la zona emergida como de la sumergida del vestíbulo de la cueva que completara el registro, ya que hay trabajos precedentes que nos indican la importancia documental de esta técnica para la gestión y ubicación espacial de los restos arqueológicos encontrados respecto a su entorno (Nocerino *et al.*, 2019).

El objetivo final era trazar un transecto entre la entrada a la cueva terrestre hasta la zona exterior sumergida que nos permitiera saber dónde sería mejor realizar un sondeo y, en su defecto, extraer una muestra de registro para así conocer las acumulaciones sedimentológicas diferenciadas en la estratigrafía.

Este método de trabajo resultó rápido y útil, aunque los resultados topográficos fueron aproximados, dentro de una tolerancia topográfica alta, dentro del margen que nos permitieron las mediciones manuales básicas. La compactación del sedimento sumergido, el oleaje, la falta de precisión en las mediciones y en los

cálculos de triangulación y la rotura de la cuadrícula por la corriente marina nos indicaron de forma clara la necesidad de mejora metodológica de estas técnicas topográficas.

La escasa columna de agua en este tipo de intervenciones manuales no permite mediciones exactas, debido a la dificultad en la tensión del flexómetro durante el cálculo de la triangulación. Además, la coyuntura vivida nos marcó la necesidad de utilizar una cuadrícula metálica que esté anclada al sustrato rocoso para intervenciones futuras.

El objetivo de este trabajo no era sólo la búsqueda de restos arqueológicos en el suelo sumergido, sino también la búsqueda de una viabilidad metodológica en este tipo de trabajos prospectivos en la zona denominada “intermareal” o de costa sumergida (Grosso *et al.*, 2019). Para ello, los condicionantes meteorológicos fueron fundamentales. Para este tipo de intervenciones es necesario el estudio previo de la oscilación térmica del mar, respecto a la influencia de la temperatura del aire y del agua y conocer la previsión del oleaje, como paso previo en la realización de un plan de seguridad y de un protocolo de actuación.

#### *8.1.2.1.1. Futuro de la prospección en la cova del Gegant*

En el caso que nos ocupa, y tras los trabajos realizados en nuestra investigación, queda patente la necesidad de utilizar una herramienta más contundente, como una perforadora mecánica, que dejara el testimonio rocoso en el centro del estrato sedimentario. Pero, para lograr este objetivo, sería necesario realizar un seguimiento regular del manto arenoso que cubre la superficie sumergida del área de trabajo externa, la cual conecta con la entrada de la cova del Gegant. Para ello debe ser aprovechado el momento en que las tormentas o la erosión del oleaje debilita ese manto arenoso y lo hace más débil. Esto permitiría recoger muestras en diferentes ubicaciones, tratando de conseguir la máxima profundidad en el sondeo.

Realmente, el proyecto de prospección en el vestíbulo exterior de la cova del Gegant pudo considerarse un campo de aprendizaje perfecto, donde se generaron

una serie de datos y unas premisas metodológicas de trabajo extrapolables al estudio del exterior e interior de cuevas cársticas sumergidas tanto a nivel técnico, metodológico, burocrático y de seguridad.

### **8.1.3. La cova de la Falconera**

#### *8.1.3.1. Interpretación metodológica*

La cueva litoral sumergida de la Falconera es una cavidad compleja donde tanto el oleaje, la climatología y la calidad del agua condicionan totalmente los trabajos en su interior. La prospección visual llevada a cabo en esta cavidad fue una prospección lineal primaria entre dos espeleo-buceadores más un tercero de seguridad. Las razones de la elección técnica y metodológica utilizada fueron qué; I) los condicionantes de pésima visibilidad del agua en el interior de la cavidad no permitían tener las garantías suficientes de seguridad para realizar una prospección lineal secundaria en busca de zonas de potencial arqueológico, II) la prospección visual se centró en guiar al AUV SPARUS II en su trayectoria de ida y vuelta por la Galería Jaume Ferran hasta la primera restricción y III) los constantes cambios en el oleaje, provocados por las oscilaciones térmicas, limitaban el tiempo en el interior de la cavidad, ya que existían muchas posibilidades de que aumentara el oleaje e imposibilitara la salida del equipo de dentro de la cavidad, por eso la primera premisa fue siempre volver con seguridad a la embarcación, fondeada en la entrada de la cueva.

##### *8.1.3.1.1. Valoración topográfica*

La georreferenciación en arqueología posibilita conocer la ubicación de un determinado yacimiento sobre el espacio, es decir, le dota de una localización única definida por una serie de puntos con coordenadas conocidas, en un sistema de referencia y en una proyección cartográfica (Davila y Camacho, 2012). Por eso, tras el análisis de los datos obtenidos en la campaña de prospección subacuática en la Falconera y tras recopilar información y cálculos de errores de

trabajos anteriores, se puede decir que, metodológicamente, el error relativo obtenido mediante el dispositivo MNEMO de las coordenadas de todos y cada uno de los puntos que definen la poligonal, ascendió a 2 metros cada 400 metros recorridos por hilo de forma planimétrica y a 2.90 metros en altimetría cada 400 metros, lo cual nos demuestra que es siempre recomendable realizar lecturas de ida y vuelta del MNEMO, para poder cerrar la poligonal y reducir los errores totales (Fumás, 2022a).

La metodología operativa empleada, en la prospección de la cueva, fue; I) la observación de una poligonal abierta, al utilizar el dispositivo de mapeo por hilo guía MNEMO, II) la comparación de ésta con la topografía manual del ECMB, mediante el cálculo de poligonales de las paredes de la cueva respecto al centro de la cavidad o al hilo guía, III) la lectura volumétrica del AUV SPARUS II y IV) la georreferenciación de la coordenada de inicio mediante teledetección del primer punto de la poligonal en superficie terrestre denominado Punto 1 (Punto 0 del MNEMO).

Es por esto por lo que, si se tenían presentes los errores introducidos por la georreferenciación y si la observación de campo, exterior al espacio confinado, era realizada correctamente, mediante una combinación de topografía clásica y uso del GPS, los errores introducidos por la georreferenciación habrían de considerarse despreciables.

### 8.1.3.2. Interpretación histórica

La cova de la Falconera es una cueva con una dinámica cambiante, donde el fuerte oleaje, la sedimentación y la alta pluviometría pueden modificar totalmente, en pocos días, la morfología interna de la cavidad, sobre todo en lo que respecta al grosor de la capa de sedimento arenoso de las galerías internas, lo cual provoca la colmatación de las galerías interiores e incluso de la propia entrada a la cavidad (Freixes *et al.*, 2021). Además, y aunque es lógico pensar que el nivel freático del agua dulce, alimentado por las surgencias internas, se ha mantenido siempre constante, debemos considerar también la idea de que es posible que el nivel freático de la cavidad se mantuviera independiente, al ser inferior en épocas de

estiaje y superior en época de lluvias, al llenarse las capas freáticas por la acumulación de las aguas del Torrente de la Falconera. Esta dinámica hidrológica sigue siendo una realidad en la actualidad, dado que, cuando se crea una acumulación de agua en el interior de las capas freáticas, la cueva entra en carga y expulsa, a modo de surgencias, toda esa acumulación de agua dulce y lixiviados contaminantes retenidos en su interior.

De este modo, si se sigue esta lógica, la cova de la Falconera nunca habría servido como un hábitat estable, ya que habría funcionado como surgencia, aunque no podemos descartar que esto siempre haya sido así. Quizá, su uso como manantial de agua dulce en su interior, podría ser la hipótesis más parsimoniosa y por ello puede haber sido uno de los condicionantes más importantes para los pobladores del macizo Garraf.

Esta hipótesis de trabajo y las indicaciones de los diferentes estudios realizados en diferentes cavidades sumergidas del mundo (Bailey y Flemming, 2008; Flemming *et al.*, 2014; Huber, 2014; Rissolo *et al.*, 2015; Flemming y Antonioli, 2017; Barba Meinecke, 2020), han marcado la estrategia de muestreo en la zona de prospección arqueológica pretendidas en esta investigación, al ser la Galería Jaume Ferrán, desde la cota -1 m hasta los -12 metros, el área de un posible hábitat temporal y aguada de los antiguos pobladores, ya que se trata de una rampa de suave pendiente que finaliza en una restricción colmatada por arena. La facilidad de acceso y la cercanía a la entrada luminosa de la cueva, la convierten en una de las áreas con más posibilidad de encontrar restos antrópicos.

Desafortunadamente, no fue posible verificar la hipótesis de Flemming (2020), en la búsqueda de un sector de la galería protegido por paredes rocosas, de ahí que tan solo un análisis micro-geoarqueológico completo del paleosuelo, ubicado bajo el manto de arena y la columna de agua, pueda responder a todas estas preguntas formuladas (Fumás, 2022a).

#### **8.1.4. La cova des Drac de Cala Santanyí**

La cova des Drac de Cala Santanyí fue la primera cavidad prospectada en el estudio de viabilidad llevado a cabo en la isla de Mallorca. Los diferentes problemas técnicos y logísticos crearon la necesidad de cribar los esfuerzos en cuevas donde se pudieran alcanzar los objetivos metodológicos marcados y donde todavía hubiera restos arqueológicos sumergidos remanentes. En esta cueva se realizó un estudio topográfico mediante una prospección visual lineal primaria y una prospección visual pendular, utilizando las mediciones mediante triangulación y eje cartesiano para geo-posicionar manualmente las piezas arqueológicas sumergidas encontradas.

##### *8.1.4.1. Interpretación metodológica*

La cova des Drac de Cala Santanyí todavía alberga, bajo las aguas de los dos lagos de su entrada, restos arqueológicos, cerámicos y óseos desde la época pretalayótica hasta la actualidad. Las prospecciones arqueológicas visuales pendulares llevadas a cabo en esta cavidad tuvieron como premisa generar un modelo prospectivo y de trabajo rápido en el interior de la cavidad mediante la topografía manual, basada y complementada con la topografía previa de la cavidad realizada con anterioridad (Gràcia *et al.*, 1998). Para ello se utilizó la técnica de triangulación y eje cartesiano básico, con el empleo del flexómetro, la brújula y el profundímetro, ubicando cada pieza sobre el plano topográfico existente (Gràcia *et al.*, 1998). Además, se generó nueva documentación fotográfica de los restos arqueológicos remanentes y se midió la potencia de sedimento en las áreas sumergidas más profundas de la Sala de Entrada, para comprobar la viabilidad de un sondeo arqueológico.

Los resultados metodológicos resultaron óptimos, aunque mejorables, ya que la coordenada de acceso a la cavidad no se tomó con GPS diferencial, no hubo mediciones estrictas con mapeo por hilo y no se generó una topografía nueva, sino que se solaparon los resultados sobre la topografía existente.

Evidentemente, los resultados obtenidos nos muestra un camino metodológico lejano al que se pretendía llegar, con unas técnicas de alta tolerancia topográfica y con resultados que tan solo podríamos considerar o definir como aproximados ya que, aunque ciertamente la triangulación nos permite la geo-posición espacial de los objetos a inventariar, no teníamos ninguna otra técnica que nos permitiera cotejar nuestros resultados, lo cual se alejaba de nuestra meta de alcanzar un método topográfico rápido, eficaz y riguroso.

De este modo, esta cueva debe estar presente en los futuros proyectos de investigación arqueológica, con la necesidad primordial de mejorar la georreferenciación de cada uno de los restos sumergidos que todavía se encuentran entre las rocas del derrumbe interno de la Sala de Entrada y en el que el presente proyecto tan solo pudo inventariar grosso modo y dar parte a las autoridades y responsables de Patrimonio de Mallorca. Como resultado de esta actuación, se procedió al cierre al público en general de la cavidad, al encontrarse en una urbanización muy transitada y turística.

#### 8.1.4.2. Interpretación histórica y arqueológica

La cova des Drac de Cala Santanyí fue utilizada desde los tiempos pretalayóticos, ya que, durante una de las inmersiones efectuadas a finales de los años 90, se recuperó una vasija cerámica pretalayótica junto a un mortero medieval de piedra. Gràcia (1998) relaciona la cronología de esta pieza con otra hallada en contextos similares en las cuevas de Menorca durante el II milenio a.C. y que se asocian a prácticas rituales (Lull *et al.*, 1999).

Actualmente, en cavidades que han padecido un importante expolio como la que nos ocupa, con restos cerámicos muy fragmentados que imposibilitan el conocimiento de su tipología concreta, si deseamos completar y corroborar estudios arqueológicos que nos preceden debemos aumentar nuestros esfuerzos en un futuro en el estudio sedimentológico, como principal herramienta para completar el conocimiento global de la cavidad cuando la prospección visual arqueológica es negativa (Gràcia *et al.*, 1998; Gràcia, 2015). Una posibilidad es que cavidades como la de Drac de Cala Santanyí, hubieran tenido un uso

antropico durante la antigüedad, probablemente como punto de abastecimiento de agua, aunque su uso pudo también estar relacionado como hábitat temporal o de refugio (Ramis y Santandreu, 2011).

### **8.1.5. La cova del Sistema Sa Gleda–Camp des Pou**

#### *8.1.5.1. Interpretación metodológica*

La intervención realizada en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou tuvo la intención de experimentar el comportamiento de los distintos métodos técnicos topográficos, en lo referente a su precisión, tiempos de empleo y comportamiento de los diferentes dispositivos electrónicos, así como la de hacer una revisión de los restos arqueológicos conservados, tanto en las galerías sumergidas de acceso, como en la antigua entrada a la cueva, denominada la Sala de los Moros, hoy en día completamente colapsada (Fig. 138.3, 138.4, 138.5, 138.6 y 138.7).

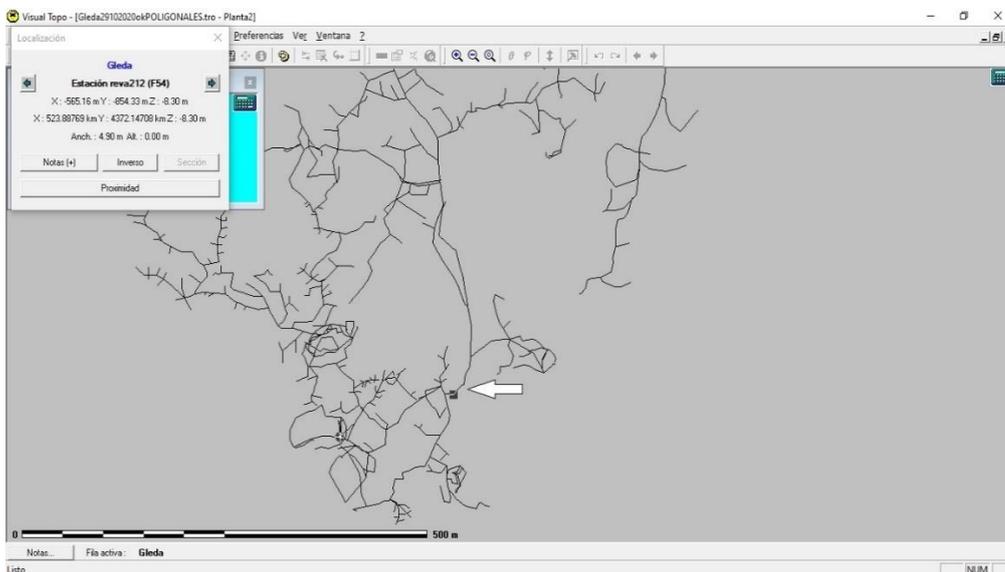
El trabajo experimentado y expuesto en el presente trabajo nos ha permitido generar una planificación prospectiva empírica, extrapolable a cualquier cavidad cárstica sumergida, gracias a la composición y correlación de las diferentes metodologías de campo y gabinete iniciadas para conseguir tanto el levantamiento georreferenciado del yacimiento como las coordenadas que definen el trayecto desde la entrada a la cavidad hasta la Sala de los Moros. Además, la intervención nos permitió generar y estructurar una metodología de trabajo de campo eficaz donde la sincronización de los trabajos, entre los equipos humanos terrestres y subacuáticos, debía ser fundamental (Fumás, 2022b).

Por otro lado, la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou es una de las más grandes de Mallorca y las autoridades de Medio Ambiente no permiten la entrada simultánea a más de seis espeleo-buceadores en la inmersión. En nuestro caso, esta particularidad nos permitió que se realizaran prospecciones visuales lineales primarias, secundarias y terciarias gracias a las grandes dimensiones de las galerías sumergidas. Todas estas inmersiones se hicieron con un mínimo de dos espeleo-buceadores, y en distintos grupos, donde siempre existía la figura de un

arqueólogo subacuático en el equipo, ya que la utilización de técnicas topográficas diversas hacía necesario la creación de grupos pequeños.

#### 8.1.5.1.1. Valoración de los resultados topográficos

La geometría de la cueva, la longitud de observación y las condiciones espaciales del entorno y de la cavidad condicionaron la metodología a emplear. Hasta ese momento, la metodología topográfica mediante triangulación empleada previamente (Gràcia *et al.*, 2007, 2010, 2020) era de una gran calidad y rigurosidad, con coordenadas muy aproximadas, si comparamos las mediciones manuales y las mediciones del MNEMO. El problema es la gran inversión de tiempo que conlleva topografiar una cavidad de estas características tan solo con un flexómetro, una brújula, un profundímetro y una libreta húmeda, sabiendo que a medida que nos alejamos de nuestro punto de origen los errores irán modificando continuamente nuestra lectura de datos y por ende la topografía completa de la cavidad (Vasseur, 2006) (Fig. 137).



**Figura 137.** Captura de pantalla del software Visual Topo, programa con el cual se ha realizado la topografía actual de la cavidad. La flecha indica donde se ubica espacialmente la Sala de los Moros. Fuente; Francesc Gràcia.

En nuestro caso, el estudio topográfico realizado en la cova del Sistema Sa Gleda-Camps des Pou, desde su entrada hasta el punto 22 final, comprendió una cavidad sumergida con entrada, pero sin salida próxima al exterior; por ello, el conjunto de metodologías empleadas contemplaba la utilización de; sistemas de mapeo por hilo, sistemas de radiolocalización entre puntos sumergidos de la cavidad, replanteo en superficie y la toma de datos con equipos GPS (Figs. 138.1, 138.4, 138.7 y 138.9).

En referencia a los equipos de radiolocalización y a la precisión de la toma de datos, cabe resaltar la dificultad de trasladar el equipo técnico en el interior de las galerías sumergidas y la importancia de la correcta nivelación de las balizas emisoras sumergibles. Éstas disponen de un nivel de burbuja para dicho fin. En nuestro aprendizaje comprendimos que, la imprecisión de ese ajuste va directamente ligado a un desplazamiento de la zona cero localizada (Leandro y Díez de la Rubia, 2017), ya que al perder la verticalidad la señal se emite de forma errónea (Fig. 72.3). Igualmente, es importante la forma de lastrar dichas balizas que, en el caso de tener flotabilidad positiva debemos obligatoriamente lastrarlas, y en el caso de tener una flotabilidad negativa deberemos añadirles un flotador. Debemos hacer hincapié en la medición de distancias (X, Y, Z) desde dichas balizas respecto al enlace con la línea topográfica, de lo contrario, no se podrían contrastar datos. También, es necesario medir la profundidad respecto del nivel del agua, si las condiciones lo permiten. De este modo, si fuera necesaria más precisión, se puede recurrir a balizas más potentes que, conllevan más detalle en la toma de datos. Lo mismo aplicado a zonas con muchas interferencias, donde habría que levantar la señal recibida a razón de la emitida (Fumás, 2022b).

Por otro lado, el propósito de obtener las coordenadas finales de la línea MNEMO era calcular una poligonal cerrada capaz de ser comprobada mediante el cálculo de errores o desviaciones de cada uno de los puntos que la componen y, con ello, validar los resultados. Ahora bien, si la cavidad hubiera tenido alguna salida al exterior, el método de radiolocalización podría haber sido suprimido y remplazado por la obtención de ese punto final mediante topografía convencional de superficie.

Así, en nuestra experiencia, el método de radiolocalización, integrado con la lectura del MNEMO y la utilización de equipos GPS en superficie, se hace imprescindible en poligonales subacuáticas de mayor longitud, puesto que permite obtener un control de los resultados obtenidos, ya sea ubicando la posición del punto final de la poligonal o la posición de puntos de control intermedios, de manera que se aumenten el número de ecuaciones en el procedimiento de cálculo y se reduzcan los inevitables errores accidentales producidos en la observación (Figs. 138.8 y 138.9).

En nuestro estudio, las rutinas de cálculo combinadas arrojaron un error máximo global de la poligonal que ascendió a 1.04 m para la coordenada X, 1.77 m para la coordenada Y y 0.09 para la coordenada Z o altura con respecto al nivel del mar. Teniendo en cuenta las características técnicas de los dispositivos utilizados para la observación, los resultados arrojaron una desviación típica *a posteriori* superiores a uno, lo que quiere decir que los resultados obtenidos fueron peores de lo esperado. De este modo, y para el fin que fueron requeridos en nuestra investigación, se dieron por válidos los resultados, pero se ha de indicar que, si se necesitase precisiones de orden menor, se podría observar una poligonal densificada por el método MNEMO. En otras palabras, una red interior capaz de compensarse a sí misma, mediante la formación de triángulos entre los puntos que la componen (Gómez, 2005; Izaguirre, 2010). Con ello, se aumentarían las ecuaciones de observación del procedimiento de cálculo y se podrían disminuir los errores y las precisiones al actuar la compensación<sup>99</sup> (Fumás, 2022b).

#### 8.1.5.2. Interpretación histórica y arqueológica

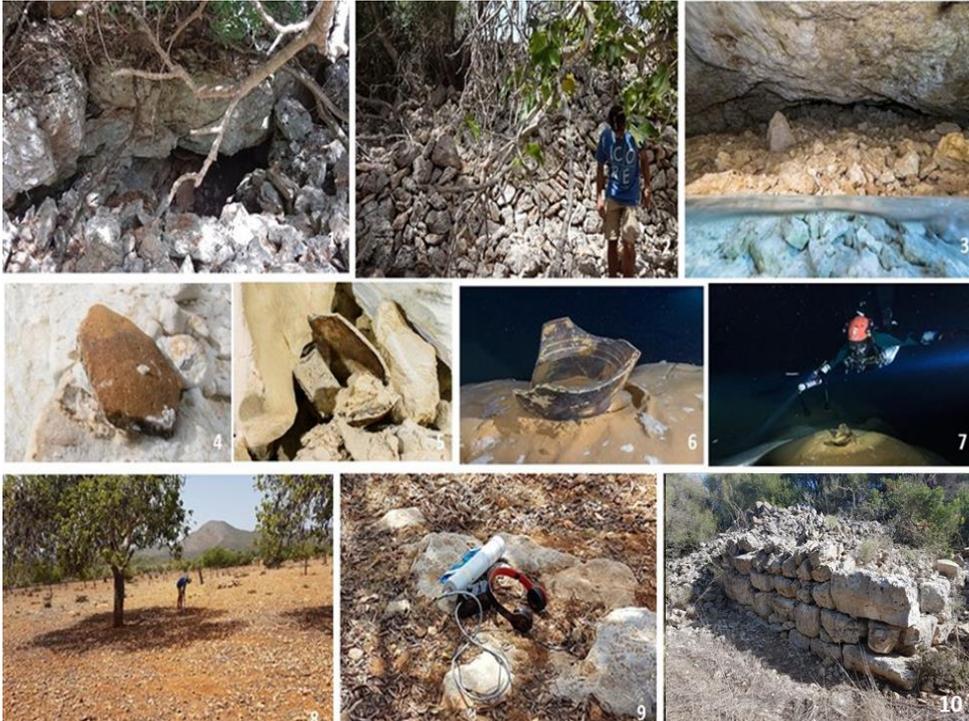
##### 8.1.5.2.1. Contextualización espacial territorial de la cavidad

Para contextualizar la cavidad debemos tener en consideración que las fincas donde se ubica la cueva son partes segregadas de la antigua posesión de Son Forteza, propiedad agraria dominada por la casa matriz fortificada en el siglo XIII.

---

<sup>99</sup> La compensación o ajuste de una poligonal es el procedimiento mediante el cual se establece la congruencia geométrica entre los ángulos y las longitudes de una poligonal cerrada.

En el siglo XVI Son Forteza conoció su primera parcelación, de la que se desmiembran las posesiones de Son Josep y Son Moixa. Pero, a partir de la segunda mitad del siglo XIX la nobleza entró en decadencia y puso en marcha la parcelación de sus tierras, sin embargo, se mantendrá el latifundio en la zona más inmediata a la costa (Amegual y Cabrer, 2005) (Figs. 139 y 140).



**Figura 138.** Imágenes de los trabajos realizados en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou en las campañas 2019 y 2020; **1.** Entrada terrestre obstruida por rocas que da acceso a la entrada secundaria a la cavidad denominada Sala de los Moros. (Foto; Autor). **2.** Acumulación de toneladas de piedra a causa de despedregar los campos agrícolas circundantes a la entrada a la Sala de los Moros. (Foto; Autor). **3.** Cámara aérea de la Sala de los Moros obstruida por el colapso y obstrucción rocosa de origen antrópico. (Foto; Florian Huber). **4. y 5.** Restos de cerámica encontrados en la pendiente de derrumbe de la Sala de los Moros. (Foto; Florian Huber). **6 y 7.** Resto cerámico encontrado en la Sala Francesc Ripoll, posiblemente un cántaro mallorquín producido entre el s. XVII y el s. XX d.C. (Foto Florian Huber). **8 y 9.** Labores de localización de la señal del emisor y detalle del receptor del PINGER. (Foto; Autor). **10.** Detalles arquitectónicos del yacimiento arqueológico de Es Bosquets. (Foto; Autor).

La parcelación y la necesidad de aumentar el rendimiento de las fincas agrícolas provocó que se arrojaran durante años gran cantidad de rocas en el interior de las entradas secundarias de la cueva, como medio para despedregar los campos de cultivo de los alrededores. Una vez que se terminó de construir las paredes secas que limitan las fincas, los sobrantes de piedras obtenidas al arar los campos, muy abundantes en la zona, se amontonaban y se transportaban en carros. Éstos, se dirigían a los hoyos y a las bocas de acceso de la cueva para vaciar allí el contenido rocoso. Así, desaparecieron los accesos al interior de la cavidad del caso que nos ocupa y de muchos lugares similares (Gràcia *et al.*, 2020) (Figs. 138.1 y 138.2).

En la actualidad sabemos que la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou tiene dos entradas, una de ellas y la principal se encuentra en la propiedad de Son Josep Nou en Manacor, donde es más fácil acceder y la segunda entrada se encuentra en el denominado Avenc des Camp des Pou. El resto de las entradas están colmatadas, siendo algunas de ellas difíciles de localizar desde la superficie (Figs. 139 y 140).



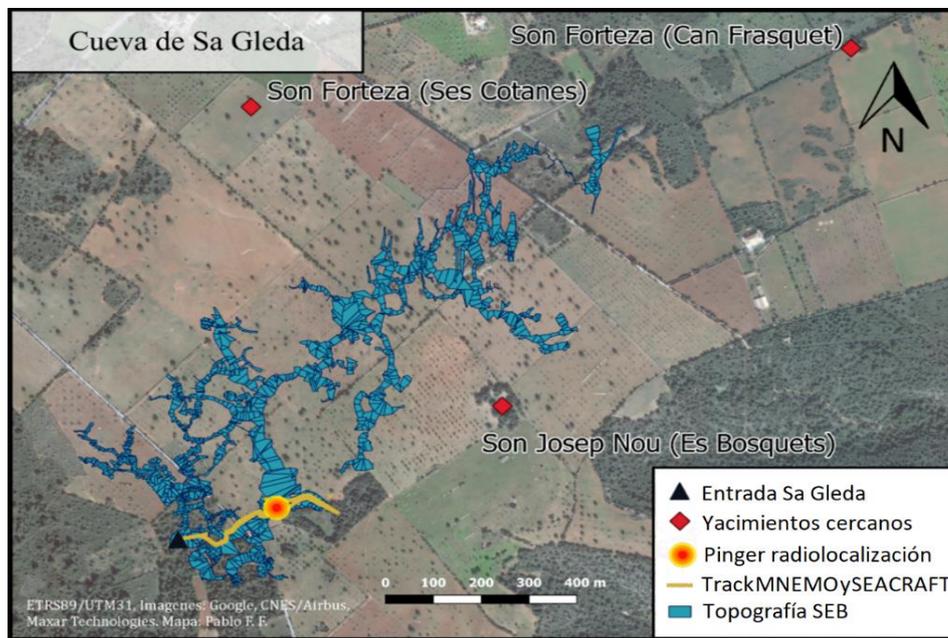
**Figura 139.** Ortofotomapa extraído del archivo de mapas históricos (vuelo americano Serie B 1956-1957) donde se aprecia la entrada de la cueva y el poblado prehistórico de Es bosquets. Fuente; IGN.



**Figura 140.** Imagen obtenida mediante dron donde se aprecia la parcelación actual de la tierra de Son Josep Nou y la ubicación de la entrada principal de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou, la entrada secundaria, que da acceso a la cámara aérea de la Sala de los Moros, y el yacimiento arqueológico más cercano correspondiente a Es Bosquets. (Foto; Florian Huber).

De este modo, y tras analizar las cartas arqueológicas del territorio próximo a la cavidad, se comprobó la existencia de restos arquitectónicos de antiguos poblados prehistóricos muy cercanos (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016). Mediante la utilización del software QGIS, se sobrepuso la ortofotografía PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea) de la zona a la topografía manual del GNM y las coordenadas de los diferentes yacimientos arqueológicos terrestres, con lo que se logró un resultado resolutivo en la concepción de las distancias y del espacio que debían recorrer los antiguos pobladores en busca de agua dulce (Fig. 141). Por ello, mediante la consulta del catálogo de patrimonio pudimos conocer qué yacimientos arqueológicos terrestres tenían una relación directa con los puntos de aguada de la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016). Uno de los yacimientos arqueológicos que durante siglos más relación ha tenido con la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou es el conjunto prehistórico de Son Josep Nou llamado Es Bosquets. Este lugar se encuentra a unos 200 metros de la entrada colapsada, indicada por el PINGER de radiolocalización, justo encima de la denominada Sala de los Moros. Este poblado presenta una coordenada UTM 31N, X: 524375, Y: 4372410, y tiene una cronología que va desde el talayótico, post-talayótico, romano, tardío, hasta el

islámico medieval. Tal como cita el trabajo de registro arqueológico de la obra “Adaptació del Catàleg dels Centres d’Interès Cultural de Manacor del Ayuntamiento de Manacor” (Gabinet d’Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016), este yacimiento era un asentamiento talayótico de un tamaño considerable, en el cual se pueden apreciar los restos de diferentes construcciones y utensilios de difícil afiliación tipológica, puesto que éstos están cubiertos por vegetación. Cabe señalar la alta presencia de materiales cerámicos de diferentes periodos cronológicos esparcidos alrededor del poblado, sobre todo cerámica indígena e islámica medieval.



**Figura 141.** Plano SIG sobre ortofotomapa donde aparecen los yacimientos arqueológicos circundantes más próximos a la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou y donde apreciamos la distancia recorrida en el mapeo por hilo del MNEMO y la ubicación del radiolocalizador PINGER en la superficie terrestre. (Autor; Pablo Fraile).

Pero, sin duda, el conjunto más predominante es el de cerámica romana y tardía, ya que se pueden observar restos de ánforas ebusitanas y ánforas romanas de todo tipo; de barniz negro, tipo A; Terra Sigillata Clásica, Itálicas, Galicas, Hispanicas (TSC); Terra Sigillata africanas, tipo A y D y probablemente algo de C (TSA-A, C, D); norteafricanas de pasta de piedra caliza romana común a parte de

materiales de construcción (tegulae), y posiblemente algunas cerámicas tardías. (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016) (Figs. 141, 142.1, 142.2 y 142.3).

Otro sitio arqueológico próximo a la cavidad es el de Can Llunes o también llamado Avenc des Camp des Pous ubicado en las coordenadas UTM 31N, X: 524476, Y: 4372968. Aquí existe una gran cueva con un lago interno que conecta bajo el agua con la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Las dimensiones aproximadas de la cueva son de 150 metros por 50 metros con una pendiente mínima de 45.5 metros (Encinas, 2014). Esta cavidad también fue estudiada por Gràcia et al. (2010) y su equipo, publicando toda la información en la revista *Endins*, ya que en su interior se encontraron pequeños restos cerámicos de difícil datación (Gràcia *et al.*, 2010). Los restos se encontraban en la parte más distal y tenían una relación directa con otros poblados antiguos existentes en la superficie y que, al mismo tiempo, todavía conservan restos de estructuras constructivas. Uno de estos sitios es el yacimiento prehistórico de Ses Cotanes, en la finca de Son Fortesa Vell, ubicado en las coordenadas UTM 31N, X: 523899, Y: 4373123, donde se conserva una naveta aislada muy arrasada que actualmente funciona como escombrera de piedras. A través de las paredes secas de los alrededores se pueden ver grandes ortostatos que podrían haber sido parte del conjunto original (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016).

Finalmente, otro yacimiento arqueológico que podría tener una relación directa con los restos del interior de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou es el yacimiento de Son Fortesa – Can Frasset, en la carretera a Cala Varques. Con coordenadas UTM 31N, X: 525123, Y: 4373251, encontramos los restos de un posible asentamiento talayótico muy arrasado. Aunque algunas estructuras pueden ser intuitas, su clasificación tipológica es completamente imposible en el estado actual de conservación y la exuberante vegetación que la cubre (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016). Además, observaremos que los márgenes circundantes se han construido sobre bloques de piedra del monumento (Fig. 142.4).



**Figura 142.** Imágenes de las construcciones en piedra seca de los yacimientos arqueológicos de Es Bosquest y Can Frasquet. **1.** Restos del muro de piedra del yacimiento arqueológico de Es Bosquets, el cual probablemente tenía una relación directa con los puntos de aguada que ofrece la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Fuente; (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016). **2.** Muro de piedra de gran extensión perteneciente también al yacimiento de Es Bosquets. (Foto; Autor). **3.** Imagen de los miles de restos de cerámica fragmentada dispersa por los restos de piedra del yacimiento de Es Bosquets. (Foto; Autor). **4.** Restos de muro del yacimiento arqueológico de Can Frasquet de posible cronología talayótica. Fuente; (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016).

## 8.1.6. La cova de la Font de Ses Aiguades

### 8.1.6.1. Interpretación metodológica

Todo proceso de documentación e interpretación arqueológica debe comenzar formulando una serie de preguntas que ayuden a completar y contextualizar el yacimiento. En el caso de la cova de la Font de Ses Aiguades las principales preguntas eran; ¿Qué puede aportar nuestra investigación al conocimiento de la

cueva?, y ¿Cuáles son los factores de análisis que debemos contemplar para completar ese estudio?

Tal como se ha comentado en anterioridad, la cova de la Font de Ses Aiguades es en la que más restos arqueológicos se han encontrado de toda la isla Mallorca. Es por esta razón que, nuestros esfuerzos se vieron enfocados a responder todas las preguntas metodológicas e históricas formuladas. La cavidad consta de galerías estrechas y angostas con muchas estalactitas que dificultan, en ocasiones, la prospección. En este caso, se utilizó la prospección visual lineal con un tercer espeleo-buceador de seguridad y prospección pendular con mediciones manuales mediante triangulación y eje cartesiano. La dificultad técnica de los trabajos en el interior de la cavidad descartó cualquier otro modelo de prospección, dando prioridad a los trabajos fotográficos antes de que la percolación y el sedimento en suspensión imposibilitaran los trabajos de campo.

#### *8.1.6.1.1. Valoración de los resultados fotogramétricos obtenidos*

De todas las tareas mencionadas hasta ahora, la fotogrametría fue, sin duda, en la que se invirtieron más esfuerzos económicos, técnicos y logísticos en su consecución. Para ello, una vez más, la metodología empleada fue la de “ensayo y error” como vía de mejora.

A pesar de las múltiples virtudes que encontramos en la fotogrametría, la principal limitación en la arqueología subacuática en cuevas vino determinada por las condiciones de visibilidad del área de trabajo, puesto que ésta es una técnica que depende exclusivamente de la captura fotográfica, con lo cual, la visibilidad siempre determinará su posible aplicación al registro del yacimiento (Domínguez, Fernández Matallana y Casaban Banaclocha, 2013; Yamafune, 2016; Mayoral, 2017; Moya y Muñoz, 2017).

Conocedores de que era recomendable establecer un orden en la toma fotográfica para que el software detectara de manera automática la superposición de imágenes, se tuvieron en cuenta las dimensiones medias del yacimiento, decidiendo empezar primero con la captura cenital del cono de depósito de

escombros y posteriormente con las capturas en contrapicado, con un ángulo de inclinación aproximadamente de 45° con respecto al objeto. Por último, se tomaron las capturas de planos perpendiculares y concéntricos de toda la superficie del objeto.

La necesidad de complementar la base de datos previa obtenida de Gràcia (2001) debía llevarnos inexorablemente a la consecución de un modelo fotogramétrico escalado y orientado que nos permitiera georreferenciar las piezas ya encontradas en campañas de excavación anteriores y comprobar la existencia de remanentes cerámicos conservados en el yacimiento. De este modo, y continuando con el estudio, el modelo fotogramétrico debía completar y contextualizar el yacimiento (Fumás *et al.*, 2022) (Figs. 122, 126 y 130).

En nuestro caso, aunque la fotogrametría de la cova de la Font de Ses Aiguades no se realizaba a gran profundidad si tenía una gran dificultad técnica, debido a la estrechez de paso entre las paredes de la galería y el cono de escombros. Por este motivo, se decidió usar una cámara Canon EOS 77D con una carcasa *Easydive*. Esta es una cámara con sensor APS-C de 24MP, que tiene una buena capacidad con poca luz y es relativamente ligera y asequible. Además, se utilizó una lente ojo de pez de la marca Sigma de 10-18 milímetros. El sensor APS-C tenía un factor de recorte<sup>100</sup> de 1.6 en relación con una cámara de fotograma completo, por lo que la lente de 10 milímetros era equivalente a un fotograma completo de 16 milímetros.

Para exponer correctamente las imágenes, dentro de la oscuridad de la cueva, era necesario utilizar luz artificial. Para ello, en nuestro caso, la mejor solución fue utilizar un par de luces de video Easydive Revolution 15000 (15000 lúmenes, ángulo de haz de 160° y temperatura de color de 5200K) y un par de luces estroboscópicas Inon Z330. La mayor parte de la luz en la imagen obtenida provenía de las luces estroboscópicas mientras que las luces de video ayudaron a rellenar los espacios, aunque lo más importante de su uso es que permitió orientar al buzo en el interior de la cavidad, ya que sin las luces de video habría un destello brillante cada segundo y posteriormente la oscuridad.

---

<sup>100</sup> El factor de recorte no es más que la relación que existe entre el sensor de nuestra cámara y el sensor de referencia estándar. Es el famoso 35mm (también conocido como Full Frame o formato completo) el que se utiliza como referencia actualmente.

Tras obtener todas las fotografías del yacimiento, se procedió a la rectificación fotogramétrica y a la obtención de la orientación interna, la cual nos permitió pasar de la perspectiva cónica a la ortogonal para crear un modelo medible. En la actualidad existen numerosos programas que permiten realizar este proceso, pero en nuestro caso, se utilizó el programa Agisoft Metashape Professional. Con él que conseguimos pasar, mediante una transformación matemática, las coordenadas píxel (fila columna) a coordenadas de la cámara expresadas en milímetros y referidas a un sistema cartesiano con origen en el centro de la cámara. Una vez obtenida la orientación interna se pasó a realizar la orientación relativa, la cual permitió relacionar geoméricamente imágenes con un recubrimiento común por coplanaridad de puntos homólogos<sup>101</sup> en pares de fotografías. Además, Agisoft Metashape Professional también se usó para crear una ortoimagen en el plano XY. Por último, usamos el software ArcGIS para superponer el modelo con líneas de contorno y una cuadrícula norte-sur.

Una vez generado el modelo de imágenes relacionadas se realizó la orientación absoluta<sup>102</sup>. Para poder realizar este proceso fue necesario conocer las coordenadas de una serie de puntos en ambos sistemas (sistema modelo y sistema terreno<sup>103</sup>) y con ellos aplicar una transformación de coordenadas. Estos puntos que necesitábamos conocer para poder realizar la orientación absoluta se denominan en fotogrametría “puntos de apoyo”, los cuales se han de tomar en el trabajo de campo con coordenadas referidas al sistema de coordenadas elegido. En nuestro caso se eligió el sistema de coordenadas ETRS 89 y la proyección cartográfica UTM para el uso 31, por ser un sistema global de referencia y el sistema más divulgado y extendido.

---

<sup>101</sup> En la coplanaridad de puntos homólogos se reconstruye la posición y orientación de cada toma fotográfica y de ésta con sus adyacentes para crear un mosaico de fotografías relacionadas posicionalmente entre sí.

<sup>102</sup> La orientación absoluta consiste en nivelar el modelo, escalarlo, trasladarlo y girarlo hasta su verdadera posición en el espacio, es decir, colocamos el modelo de imágenes en el lugar preciso que ocupa dentro de la tierra.

<sup>103</sup> El modelo digital del terreno (MDT) recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno. Por el contrario, un modelo digital de superficies (MDS) representa todos y cada uno de los elementos del terreno, como; el suelo, los árboles, las construcciones, etc.... es decir, el MDS nos da las cotas de cada elemento.

Por otro lado, cuando en fotogrametría hablamos de una georreferenciación aplicada a un contexto subacuático cárstico nuestro porcentaje de precisión dependerá directamente de la tolerancia topográfica que estemos dispuestos a soportar, ya que esta premisa variará los resultados en la fiabilidad y concreción del modelo. En el caso de la cova de la Font de Ses Aiguades, el hecho de poder conocer la coordenada centimetrada del punto 0 nos permitió ofrecer al software fotogramétrico un dato real y concreto, lo cual se extrapoló en unas coordenadas de la dispersión cerámica concretas, creando la posibilidad de generar una base de datos que enumere, ordene y clasifique los objetos arqueológicos de un modo acertado (Fig. 126). Además, se ha de decir que esta precisión sintetizada en la obtención de puntos coordinados georreferenciados en un entorno subacuático y confinado varía dependiendo de ciertos aspectos que no se pueden controlar, como son la geometría de la cueva y la distancia entre el yacimiento y el exterior.

Sin duda, los sistemas de análisis fotogramétrico nos permitieron una importante precisión metodológica, un ahorro de tiempo considerable, unos protocolos de actuación definidos y una adquisición de datos precisa (Mayoral, 2017; Moya y Muñoz, 2017). El problema se presenta cuando, aunque tengamos un modelo escalado y orientado, desconocemos su georreferenciación concreta porque no disponemos de un punto 0 de referencia correcto (Fumás, 2022b) (Fig. 119).

#### 8.1.6.1.2. Valoración de los resultados topográficos

Los datos obtenidos por el dispositivo de radiolocalización PINGER, en la campaña del año 2019, fueron óptimos, con una recepción de la señal alta y clara desde la superficie terrestre, lo cual permitió un geoposicionamiento exacto en la ubicación de los restos óseos del *Myotragus balearicus*. Además, este geoposicionamiento nos sirvió para hacer una primera triangulación, lo cual nos permitió conocer el tamaño real de la cueva, comprobando si era correcta la topografía realizada a finales de los años noventa.

Pero, sin duda, fue en la campaña de trabajo del año 2020 (tal como se explica en el apartado 7.4.5.1.3) cuando la entrada al equipo humano de un topógrafo profesional mejoró exponencialmente los datos obtenidos. El procedimiento

consistió en el estacionamiento del equipo topográfico para conseguir vértices observados con GPS, y así obtener, por radiación, la observación del punto del gancho que unía el espacio exterior con el yacimiento. Este punto de control y el punto en la cúspide del cono de depósito de escombros tenían la misma coordenada georreferenciada, por lo que se logró conocer exactamente el geoposicionamiento del denominado punto 0 o punto de referencia del modelo fotogramétrico y de las mediciones manuales.

#### 8.1.6.1.3. Valoración del registro manual de piezas cerámicas y puntos de control

La valoración sobre el registro y documentación topográfica de las piezas sumergidas, utilizando solo utensilios básicos como el flexómetro, la brújula y el profundímetro, resultó un tanto controvertida ya que este registro fue insuficiente e inexacto, ya que no se contemplaron factores como la declinación magnética ( $D_m$ ) ni el magnetismo que provocaban en la brújula los objetos metálicos sumergidos en el cono de escombros, obteniendo una dirección desviada e incorrecta denominada Norte de Aguja ( $N_a$ ) (véase capítulo 5.1.). El cálculo de la medición manual de los puntos de control, como herramienta de comparación de los parámetros de orientación y escalado del modelo fotogramétrico, tan solo se podrían haber mejorado mediante la técnica del mapeo con hilo con el dispositivo MNEMO (Kister, 2017), lo cual hubiera hecho necesario la instalación de hilos guía tensados desde el punto 0 hasta cada uno de los puntos de control. De este modo, se hubiera realizado la observación con el aparato MNEMO de las visuales que el hilo describía, obteniendo con ello las coordenadas polares ( $D_g$ ,  $AZ_{\text{magnético}}$ ,  $\Delta Z$ ) de cada punto con una mayor exactitud, ya que el aparato utilizado en ese caso sería más preciso en sus mediciones. Se ha observado empíricamente en otros casos que la precisión alcanzada de los puntos de control sería del orden de los 10 cm (Fumás, 2022b) (Fig. 128).

#### 8.1.6.1.4. Valoración de la seguridad e higiene del agua

El estudio de las condiciones higiénicas de las aguas subterráneas es fundamental para la seguridad e higiene de los equipos arqueológicos subacuáticos. Es especialmente importante en los casos donde estas aguas se encuentran cerca de áreas densamente pobladas. En nuestro caso, el estudio de la calidad del agua pretendía, sobre todo, garantizar la salud del equipo humano que realizaba los trabajos subacuáticos, tratando de evitar cualquier producto nocivo. Además, las condiciones químicas y biológicas del agua de la cova de la Font de Ses Aiguades nos debían indicar en qué condiciones se encontraban los restos arqueológicos sumergidos, sabiendo que a partir de los seis metros de profundidad comienza a aumentar la salinidad del agua debido a la intrusión marina (Fernández, 2003; García-Castrillo, Lanuza y López, 2003). También la caracterización de las aguas es importante para su relación como punto de aguada en la antigüedad.

Por otro lado, tal como hemos mencionado anteriormente, hay diversas hipótesis que defienden el uso del agua de cova de la Font de Ses Aiguades para uso medicinal. Normalmente, en las aguas cloruradas medicinales de los balnearios aparece el anión cloruro y los cationes predominantes suelen ser el sodio, el calcio o el magnesio. La mineralización total debe superar 1 g/L. Las de muy alta mineralización (más de 50 g/L) suelen ser frías y las de baja mineralización suelen ser termales. Este tipo de agua suele ser estimulante de múltiples funciones orgánicas. Las acciones concretas sobre los sistemas orgánicos dependen de la mineralización total del agua y de la vía de administración. Se suelen usar en reumatología, dermatología, afecciones respiratorias crónicas, y en estados de agotamiento psicofísicos (Espinosa, 2002).

Las aguas ricas en cloruro, por vía interna presentan una acción antidiurética y estimulante de la secreción gástrica y biliar y, por vía externa, su acción es antiséptica, antiflogística y estimulante de la cicatrización. Se recomiendan especialmente en el tratamiento de afecciones quirúrgicas traumáticas, reumatológicas, dermatológicas y respiratorias, neuralgias y problemas ginecológicos (Espinosa, 2002).

En el caso que nos ocupa, los valores obtenidos del análisis químico del agua de la cova de la Font de Ses Aiguades sobrepasaban en todos los casos los límites recogidos en la normativa del Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (véase capítulo 7.4.5.4.3.2.), ya que los niveles de sulfato sobrepasaban el límite establecido por 40 mg/L, mientras que el porcentaje de sodio presentaba valores 4 veces superiores y el cloruro hasta 6 veces más. Estas lecturas se deben a que el agua muestreada era una mezcla de agua salada con agua meteórica (dulce) y por ello quedaban lejos de los valores aceptables para el uso de consumo humano, aunque carezca de peligro para la realización de los trabajos arqueológicos al no presentar contaminación.

Por lo que respecta al uso del agua como tratamiento medicinal, no podemos aportar datos concluyentes a este respecto, pero tampoco es descartable que en contextos cronológicos pasados un aumento de la intrusión marina aumentara los niveles de cloruro de la mezcla y ésta pudiera tener propiedades medicinales, dependiendo de la mineralización alcanzada en estos periodos concretos (Rubio, 2014).

#### 8.1.6.2. Interpretación histórica y arqueológica

La cova de la Font de Ses Aiguades no es en absoluto la única cueva en Mallorca donde se han encontrado restos arqueológicos. Por ejemplo, en la cova de s'Esfondrat d'Es Dolç (Gràcia *et al.*, 2014) el agua es mucho más salada y se encontraron ánforas en su interior, lo mismo que en la cova des Drac de Rafal des Porcs (Deyà, Colom y Gràcia, 2022; Gràcia *et al.*, 2022), o la cova des Moros de Sa Dragonera (Ginés y Ginés, 2010) e incluso en la cova de Sa Llumeta de Sa Conillera con acceso directo al mar (Trias, 1972).

La realidad es que, aunque el acceso a la cueva resultó en ocasiones claustrofóbico, al tener que descender por un pozo estrecho y oscuro, la verticalidad directa del yacimiento con la entrada a la cavidad hace de la cova de la Font de Ses Aiguades un *unicum* en la arqueología subacuática en cuevas sumergidas.

La cueva cuenta con una intrusión marina que saliniza el agua, pero posiblemente en época de mayor pluviosidad y con unos niveles de explotación de los acuíferos de la isla de Mallorca inferiores a la actualidad, los niveles de agua dulce del freático pudieron haber sido superiores haciéndola potable (Rubio, 2014). La presencia de materiales arqueológicos de distintos momentos cronológicos podría confirmar esta hipótesis en la variación de la calidad del agua de la cueva, quizás dependiendo de factores de carácter local. La dificultad de evaluar la calidad del agua en el pasado no nos permite avanzar de manera precisa, y tan solo nos permite elucubrar posibles hipótesis sobre su uso concreto (Fumás *et al.*, 2022).

#### 8.1.6.2.1. *El estudio arqueológico de la cueva*

La gran complejidad en la elaboración de una base de datos de los distintos restos cerámicos encontrados en la cova de la Font de Ses Aiguades hizo necesario el registro y estudio de todas y cada una de las piezas y la redacción de dos informes sobre catalogación e interpretación del yacimiento.

Durante la campaña del año 2020 se identificaron un total de 27 objetos. Sin embargo, ese número no refleja la multitud de fragmentos cerámicos y de otros objetos que se encuentran todavía en esa cavidad (Tabla 23).

La extracción de numerosas piezas en la campaña de 1998 había dejado pocos objetos arqueológicos clasificables en superficie, pero la realidad es que, bajo los restos de los bloques, y en las partes más profundas de la cueva, se encuentran todavía centenares de fragmentos.

Entre los objetos documentados en el marco de la presente tesis, se han podido identificar tres etapas históricas que confirman las interpretaciones previas y que se corresponden con la época romana, la islámica y la moderna. Los materiales arqueológicos de ambas intervenciones nos permiten realizar una interpretación arqueológica del yacimiento ubicado en el interior de la cova de la Font de Ses Aiguades.

## INVENTARIO ARQUEOLÓGICO DE LA CAMPAÑA DE PROSPECCIÓN EN SA FONT DE SES AIGUADES (2020)

Nº	Zona	Sector	Objeto	Tipo	Forma
1	C	2	Ánfora Púnicoebusitana	PE-24	Base
2.1	B	4	Cántaro mallorquín	-	Borde
2.2	B	4	Cántaro mallorquín	-	Base
5	D	3	Ánfora Tarraconense	Dressel 2	Borde/Asa
7	D	2	Ánfora Tarraconense	Dressel 2-3	Asa
10.1	B	3	Ánfora Tarraconense	Pascual 1	Asa
10.2	B	3	Ánfora Tarraconense	Pascual 1	Asa
12.1	D	6	Ánfora Tarraconense	Pascual 1	Base
12.2	D	6	Ánfora Indeterminada	-	Base
13	C	3	Ordeñadora Islámica	Jarrito Bf	Borde
14	C	5	Ánfora Bética	Dressel 9	Borde
19	D	5	Cántaro mallorquín	-	Asa
20	B	4	Cántaro mallorquín	-	Asa/Base
S/N 1			Ánfora Tarraconense	Dressel 2	Borde
S/N 2			Ánfora Tarraconense	Dressel 3	Cuerpo
S/N 3			Ánfora Indeterminada	-	Base

**Tabla 23.** Inventario arqueológico de la campaña de prospección en cova de la Font de Ses Aiguades del año 2020. (Autor; Antonio J. Talavera).

Hasta el momento se han publicado tres artículos que hacen referencia a los hallazgos arqueológicos de la campaña de 1998. Tras un análisis comparativo entre los tres artículos publicados (Gràcia *et al.*, 2001; Colom y Járrega, 2018, 2020) y la información extraída en la campaña de campo realizada en el marco del presente trabajo, se realizó un ensayo comparativo para contextualizar y generar

hipótesis históricas, tanto sobre la metodología usada para extraer agua de la cavidad como de las posibles cronologías históricas que utilizaron la cavidad como punto de abastecimiento de agua.

Así, y tras recopilar toda la información expuesta, observamos la notoriedad e importancia de la cova de la Font de Ses Aiguades durante toda la historia, al menos desde época romana. Conocedores de la intervención que se llevó a cabo en 1998, en la que se extrajo parte de los materiales de los periodos mencionados, continuamos con la investigación en la campaña de 2020 identificando ánforas romanas, cerámicas islámicas y cantaron mallorquines. Indudablemente los tipos cerámicos identificados se pueden relacionar con una actividad de extracción de agua desde el siglo II a.C. hasta el siglo XX, con fases de extracción más o menos intensas, dependiendo del contexto histórico. Actualmente, la cavidad sigue siendo objeto de explotación por parte del campo de golf de Alcanada.

En este sentido, debemos señalar que, en los primeros siglos de la dominación romana de Hispania, la cova de la Font de Ses Aiguades jugó un papel estratégico en las rutas marítimas entre la zona layetana y la península itálica, tal y como han señalado Járrega y Colom (2019). Entre el siglo II a.C. y mediados del siglo I a.C. las embarcaciones mercantes navegaban desde la península itálica, por el sur de la Galia, hasta el norte de Cataluña, para luego dirigirse a las Baleares y volver de nuevo a la península itálica a través del estrecho de Bonifacio. Mientras que, a partir de la segunda mitad del siglo I a.C., son las producciones hispanas las que viajan, por la ruta de las Baleares, desde la península ibérica a lugares como Campania o la propia ciudad de Roma. Las producciones layetanas se redistribuían ocasionalmente junto a producciones béticas, arribadas en otras naves desde el sur. Las embarcaciones, con cargas exclusivamente layetanas o compuestas, partían desde puertos como Barcino con dirección a la península itálica. En ambos momentos, se puede apreciar la importancia estratégica de esta cueva para el abastecimiento de agua de las naves mercantes romanas. El uso de sus aguas parece ser muy constante en el periodo aproximado entre el 30 a.C. y el 70 d.C. y se relacionaría con este contexto histórico (Colom y Járrega, 2020).

Aunque seguramente su uso continuó en los siglos posteriores, entre el material identificado en el interior de la cueva, solo se encontró ánforas de producción

bizantina entre los siglos VI y VIII d.C. La expansión del Imperio Bizantino de manos de Justiniano alcanzó las Baleares y zonas del sur peninsular. La reactivación comercial con origen oriental se restableció tímidamente, pero sin lugar a duda, la cova de la Font de Ses Aiguades, debió ser importante para estos marineros de largas distancias que navegaban por la ruta de las Baleares.

La ocupación musulmana también supuso un cambio en el uso de este enclave. De esta fase se han encontrado pequeños contenedores que nos indican un uso más esporádico, desarrollado con seguridad por los pocos habitantes de la alquería de Alcanada. Es muy posible que también se utilizase para consumo humano, pero puede intuirse un posible uso agrícola. Algunos de los objetos identificados y la poca presencia de cerámicas islámicas podría deberse a la existencia de una noria de tiro islámica. A pesar de ello, gracias a los restos cerámicos encontrados, el consumo humano de estas aguas parece darse hasta la conquista catalana de 1229 (Barceló, 2006).

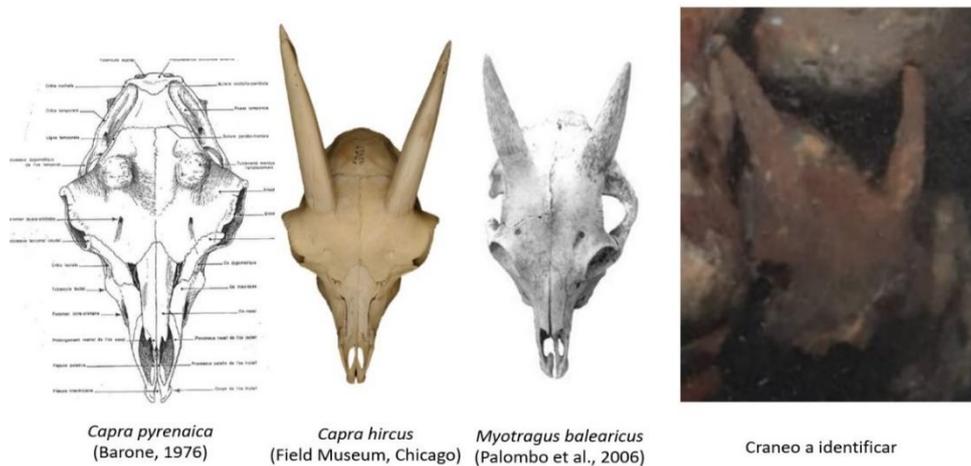
No está claro el uso que tuvo el agua de la cova de la Font de Ses Aiguades en los siglos XIV y XV. Por el momento no se han identificado objetos de este periodo histórico, pero esto no significa que el agua no se extrajera con fines domésticos o agrícolas. Entre el siglo XVI y la segunda mitad del XVIII, el consumo de agua se disparó por el aumento de viñedos y huertas. Durante este periodo, los agricultores se acercaban a la cavidad para extraer el agua de un pozo y transportarla en cantaros, hasta sus cultivos cercanos (Marlasca y López, 2014).

Por último, creemos que a finales del XVIII o a lo largo del XIX debió instalarse una “sínia de cadufos” (noria de tiro de arcaduces) para garantizar una extracción continua de agua para regar los cultivos de Alcanada. Los viñedos fueron el cultivo dominante en la Mallorca decimonónica, pero la llegada de la filoxera y otras enfermedades que afectaban a la producción agrícola provocó el abandono de fincas y de las norias a finales del XIX e inicios del XX. Creemos que la extracción de agua se estancó hasta mediados del siglo XX cuando se construyó la caseta y se instaló la bomba hidráulica de la que aún quedan vestigios.

#### 8.1.6.2.2. El estudio paleontológico de los restos óseos de la cueva

Al no tener autorización por parte de las autoridades de Patrimonio de la Conselleria de Mallorca para manipular ni tocar ningún resto arqueológico ni paleontológico, los paleontólogos del equipo solo pudieron utilizar las fotografías obtenidas, a partir de capturas de video, en las que se apreciaba el cráneo de un cáprido sin identificar (Fig. 143).

Para conseguir más información al respecto, nos pusimos en contacto con la zooarqueóloga del equipo, Alba Ruiz, quien realizó un estudio más exhaustivo para tratar de identificar si el cráneo era realmente de un ejemplar doméstico o de un *Myotragus balearicus*, especie endémica de la isla.

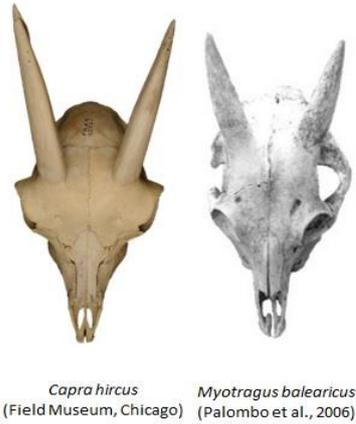


**Figura 143.** Imagen de diferentes cráneos pertenecientes a distintas especies de capridos. Fuente; (Palombo *et al.*, 2006).

Las diferencias anatómicas presentes en las distintas especies marcan la heterogeneidad a la hora de identificar cada una de ellas (Fig. 144).

Diferencias principales entre las dos especies:

<i>Capra hircus</i>			<i>Myotragus balearicus</i>		
Morro más ancho, sobre todo la parte proximal			Morro más delgado		
Fosas oculares más pronunciadas y en dirección a los laterales	más		Fosas oculares menos pronunciadas i con dirección frontal		
Hueso zigomático más pequeño	más		Hueso zigomático muy pronunciado y redondeado		



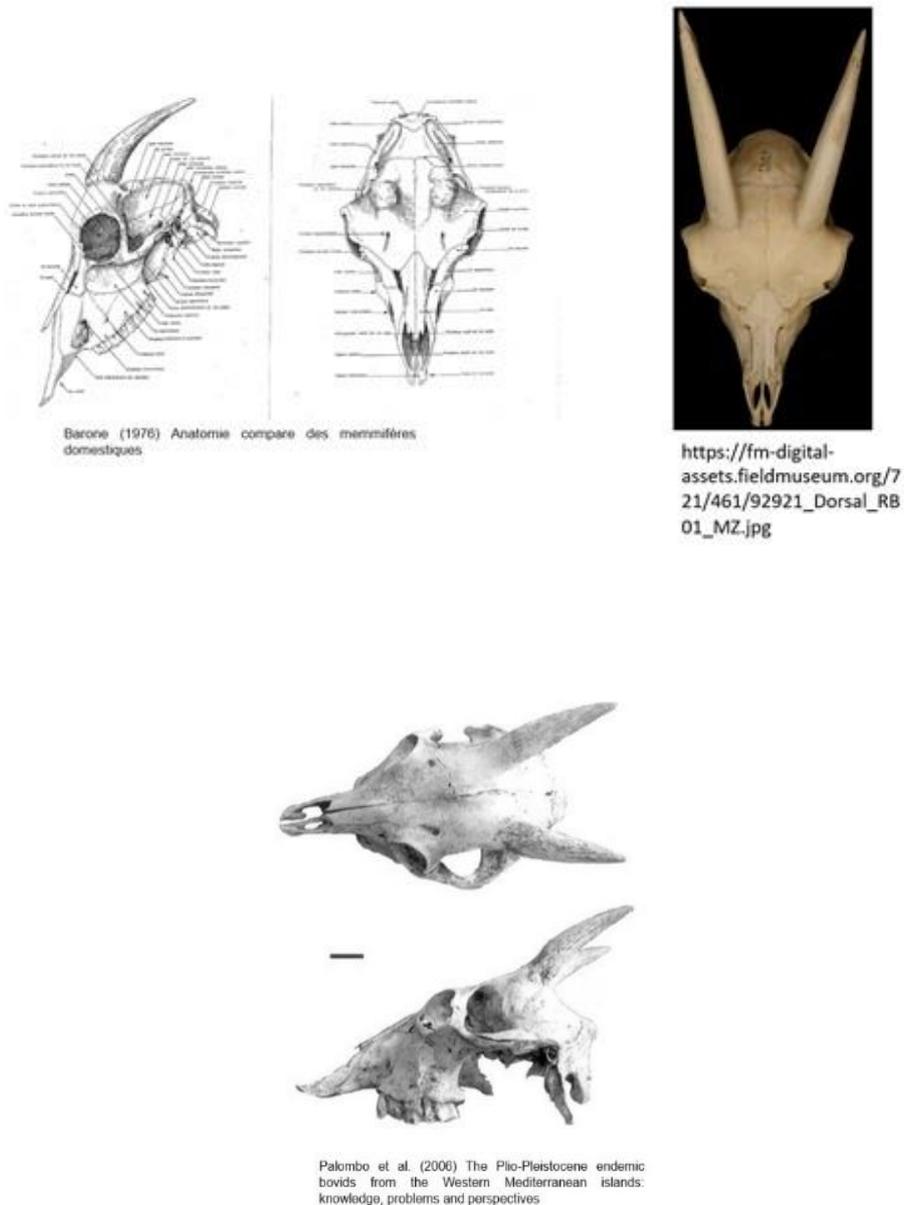
**Figura 144.** Detalle de las diferentes óseas entre las dos especies caprinas reflejadas en la morfología de su cráneo. Fuente; (Palombo *et al.*, 2006).

La conclusión obtenida fue que faltaban rasgos diagnósticos para determinar la especie puesto que el ejemplar no presenta ni el hocico (1) ni el hueso cigomático (2). Y aunque sí parecía presentar los agujeros oculares en una dirección frontal (3), la resolución de la fotografía no nos permite descartar que sea un ejemplar doméstico (*Capra hircus*) con las fosas erosionadas (Prummel y Frisch, 1986) (Figs. 145 y 146).



**Figura 145.** Detalles morfológicos craneales indicados mediante fechas elaborado por la zooarqueóloga Alba Ruiz para el Proyecto IASCM. (Foto; John Kendall).

Respecto al análisis de los restos óseos remanentes de *Myotragus balearicus* debemos pensar que el equipo de GNM a finales de los años 90 entregó diferentes muestras óseas al Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA), quedando a cargo del Dr. Josep Antoni Alcover. Todos estos restos fueron ya sometidos a un proceso de desalado y estudio científico (Alcover y Ramis, 2004).



**Figura 146.** Cráneo de un *Myotragus balearicus* desde su parte dorsal y lateral. Escala 20 milímetros. Fuente; (Palombo *et al.*, 2006).

Técnicamente, gracias a la fotogrametría pudimos localizar, geo posicionar y medir el cráneo del individuo sin necesidad de tener escala métrica en el momento de la captura fotográfica (Fig. 144). Actualmente no se puede corroborar que el cráneo encontrado en la campaña de prospección de octubre del año 2020 perteneciera al mismo espécimen de *Myotragus balearicus* que el que se encuentra ubicado en la galería de su mismo nombre, ya que para conseguir una clasificación taxonómica se deben completar una serie de parámetros que permitan diferenciar si los huesos a identificar son de oveja o cabra (Alcover y Ramis, 2004; Bover y Ramis, 2005; Palombo *et al.*, 2006). En el cráneo frontal de las cabras, aparte de los núcleos del cuerno, el techo frontal de la órbita muestra una hendidura lateral distinta a la base del núcleo del cuerno, el cual falta en las ovejas. Además, la parte ósea, entre el occipital y el temporal es ancha y triangular en las cabras, y estrecha y oblonga en las ovejas. El hueso parietal difiere en forma en los dos géneros debido a la forma de las suturas entre el hueso parietal, frontal y occipital. En las ovejas, la sutura parietooccipital es recta (horizontal), mientras que en las cabras es curva. Además, en las ovejas, las suturas frontoparietales forman un ángulo mientras que en las cabras forman una línea recta (Prummel y Frisch, 1986).

#### 8.1.6.2.3. Contextualización histórico territorial de la cavidad

Bajo esta denominación se pretende contextualizar y reconstruir los paisajes arqueológicos y los procesos sufridos por la cavidad a lo largo de la historia. Como cualquier otro trabajo científico la prospección arqueológica subacuática tiene una primera fase de documentación y estudio de fuentes bibliográficas y de información, como son la cartografía o los textos escritos para recopilar información exhaustiva sobre la zona en la que se va a trabajar (León, 2003).

En el caso que nos ocupa y tras analizar la cartografía existente en el Instituto Geográfico Nacional (IGN) nos dimos cuenta de que en el año 1956 aparecía una cantera sobre la misma cueva (la línea amarilla en las fotos adjuntas nos indica la distancia entre el acceso a la cueva y la línea de costa). Esto, sin lugar a duda, tuvo que causar algún tipo de influencia al yacimiento arqueológico del interior de

la cavidad. Por esta razón, era necesario profundizar en este aspecto para entender el porqué de semejante acumulación de sedimento en el interior del pozo (Figs. 147 y 148).



**Figura 147.** Ortofotomapa del IGN del año 1956 en Alcanada (línea amarilla indica la distancia entre la costa y el acceso a la cueva) donde se aprecia la cantera donde se extraía escollera para el puerto de Alcúdia. Fuente; IGN.

En este caso, dentro del proyecto de documentación del Proyecto IASCM 2020, Francesc Gràcia se puso en contacto con Antoni Mayol de l'Arxiu Històric Municipal d'Alcúdia y con Juan Pérez, espeleo-buceador de la SEB y de la FEB (Federación de Espeleología Balear), conocedores de las fuentes orales de la zona de Alcanada, para intentar averiguar más sobre las características y la cronología de esta cantera. Poco después Antoni Mayol nos facilitó el contacto de Manuel Espinosa y Antoni Domingo quien a su vez nos facilitaron una serie de información coincidente a la recibida por Juan Pérez.



**Figura 148.** Ortofotomapa del PNOA extraída de la página del IGN del año 1997 de la zona de Alcanada donde vemos como aparecen ya los accesos al campo de golf, las urbanizaciones colindantes con las obras finalizadas y la cantera cubierta por vegetación. Es en esta ocasión cuando dice la gente del lugar que el hecho de haberse construido la caseta de obra sobre el pozo de acceso a la cavidad fue lo que protegió a la misma del desprendimiento de rocas y sedimento de la obra de construcción y asfaltado. Fuente; IGN.

Las extracciones más importantes en la cantera de Alcanada, y las cuales han dejado huella en el relieve, se realizaron en los años cuarenta y cincuenta, con dos motivos: la construcción del dique del muelle nuevo y la construcción de la central térmica de Alcanada. El proyecto del muelle inicial del puerto comercial se redactó en 1932 iniciándose los trabajos en 1936, aunque éstos se paralizaron nada más comenzar con motivo de la guerra civil española. A principios de los años cuarenta se retomaron las obras, instalándose incluso un tren industrial cuyo trazado iba desde la cantera, ubicada encima de la cueva, hasta el muelle del puerto de Alcudia, por el borde del mar (Molina De Dios, 1995) (Fig. 149.1).

Como en el caso de Palma, la escollera necesaria para construir los 420 m<sup>2</sup> del nuevo dique, frente al antiguo Lazareto, debía obtenerse de una cantera próxima y ser transportada por ferrocarril. Es por esto por lo que, la línea proyectada unía el punto de arranque del dique con una antigua cantera situada en la finca de Alcanada, frente al islote del mismo nombre y concretamente sobre la cova de la Font de Ses Aiguades. La distancia por cubrir era de poco más de 2000 metros y

el trazado, que corría paralelo a la costa, no presentaba ninguna dificultad notable (Figs. 149.1 y 149.3).

Tras varios problemas administrativos la empresa “Dragados y Construcciones” llegaba a un acuerdo con los propietarios de la cantera, los herederos de Miguel Sampol Tous, propietarios de Alcanada, y la obra era adjudicada a esta empresa en septiembre de 1947. Tras la reanudación de los trabajos la línea férrea fue finalmente tendida y entre 1948 y 1953 se transportaron un cuarto de millón de toneladas de escolleras (Molina De Dios, 1995).

El puerto de Alcúdia, pequeño y de poco calado, no podía recibir a buques medianos que debían fondear sin amarre y transportar la carga en barcazas. Por otra parte, la creciente importancia de las instalaciones militares en la zona requería de un muelle apto para la descarga de buques de mediano tonelaje. Los primeros estudios para construir un nuevo dique se iniciaron ya en 1933, pero fue en 1941 y en 1943 cuando el ingeniero Gabriel Roca redactó la base del proyecto que acabó ejecutándose con la terminación de los trabajos a finales de 1953, levantando entonces la línea (Figs. 149.2 y 149.4). Las obras finalizaron definitivamente en diciembre de 1954. El único vestigio de su existencia es la explanación que en parte fue aprovechada posteriormente para trazar un camino costero que bordea la actual zona residencial para veraneantes (Soler, 2004) (Fig. 149.3). La siguiente explotación, que vino a continuación de ésta, fue la construcción de la central térmica de Alcanada, entre 1955 y 1958 (Fig. 150).



**Figura 149.** Imágenes antiguas de la zona de extracción de la cantera sobre la cova de la Font de Ses Aiguades y del puerto de Alcúdia; **1.** Locomotora Orenstein & Koppel 020T 11 arrastrando los vagones bateas de escombrera desde la cantera hasta el puerto de Alcúdia. Fuente; (Molina De Dios, 1995). **2.** Foto obtenida del Archivo del Fondo histórico de ENDESA del muelle y la central térmica de Alcudia. **3.** Grúas trabajando sobre la cova de la Font de Ses Aiguades acumulando rocas para ser transportadas por las vagonetas del tren a Alcudia. Fuente; (Molina De Dios, 1995). **4.** Puerto de Alcudia en la actualidad donde todavía se puede observar la escollera extraída de la cantera ubicada sobre la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; <https://www.portsdebalears.com/es/alcudia>.

Años más tarde, en los años 60 un británico compró los terrenos circundantes a la cueva y realizó una serie de obras menores como un campo de tenis y varias edificaciones, entre ellas la pequeña caseta sobre el pozo de acceso a la cavidad. Esta caseta albergaba una serie de tuberías metálicas, todavía presentes en la actualidad, para la extracción de agua para uso urbanístico.



**Figura 150.** Ubicación de los dos puntos que recorría la línea férrea para el transporte de la escollera desde la cantera al puerto. Fuente; Google Earth.

Ya, por último, en los años 90 se realizaron nuevas tareas urbanísticas importantes como el acceso al campo de golf de Alcanada, el cual sigue activo y a pleno rendimiento actualmente (Fig. 151).



**Figura 151.** Obras de urbanización y acceso al campo de golf de Alcanada en los años 90 donde se aprecia como la caseta protege la cavidad. (Foto; Francesc Gràcia).

#### 8.1.6.2.3.1 *Hipótesis histórica*

La localización de las fotografías aéreas del IGN y la bibliografía específica de los investigadores Ramón Molina de Dios y Rafael Soler Gayà nos dio pistas concluyentes y nos ayudó a generar hipótesis históricas para entender cómo había podido llegar todo ese material arqueológico dentro de la cavidad y sobre el porqué de la existencia de un importante cono de escombros en el interior de la cueva. Con el conocimiento obtenido sobre la explotación de esta cantera podemos entender y contextualizar el yacimiento y suponer que este fue el fenómeno que destruyó o modificó el mismo. Con gran seguridad muchas de estas rocas, introducidas o no accidentalmente en el interior del pozo, causaron grandes daños a los restos cerámicos del yacimiento y ese daño irreparable no fue reversible.

Es por esto por lo que, debemos pensar que la Font de Ses Aiguades quizás no haya sufrido un expolio de material arqueológico tan severo como otras muchas cuevas de Mallorca (Genovesa o d'en Bessó en Cala Anguila o Rafal des Porcs en Cala Santanyí), pero lamentablemente sí que ha sufrido una serie de acontecimientos antrópicos severos a su alrededor que han afectado la morfología interior de la cueva y del yacimiento. Algunos de estos factores son; el alto grado de urbanización en sus alrededores y la explotación durante años de una cantera de escollera a apenas unas decenas de metros de la entrada a la cavidad.

Según nuestra investigación, con toda probabilidad la escollera sumergida en la cova de la Font de Ses Aiguades tiene el mismo origen que la extraída de la cantera y transportada al puerto de Alcúdia (Fig. 152.1). Esto significaría que antes de la década de los 50 del siglo pasado la cueva tendría sumergidas una cantidad de ánforas indeterminada formando un montículo (Fig. 152.4). Con la introducción antrópica de la escollera en el interior del pozo gran parte de estas ánforas quedarían enterradas y otras tantas se desplazarían alrededor del cono de depósito de escombros, empujadas por el movimiento del agua (Fig. 152.2 y 152.3). De este modo, todos los restos arqueológicos encontrados en las pendientes del cono habrían sido colocadas antrópicamente en esa ubicación, quizá cuando alguien trató de expoliarlas y no pudo extraerlas a causa de su peso,

o cuando se extrajeron controladamente a finales de los años 90 y algunas quedaron fragmentadas sobre el cono.

La posible contextualización histórica o arqueológica de todos estos hechos esgrimidos solo podrá ser confirmada con un análisis geológico de la escollera sumergida y posteriormente por una excavación arqueológica meticulosamente controlada, primero del área alrededor del cono de depósito de escombros y posteriormente del propio cono del yacimiento, con la intención final de observar y documentar su estratigrafía geológica y arqueológica.

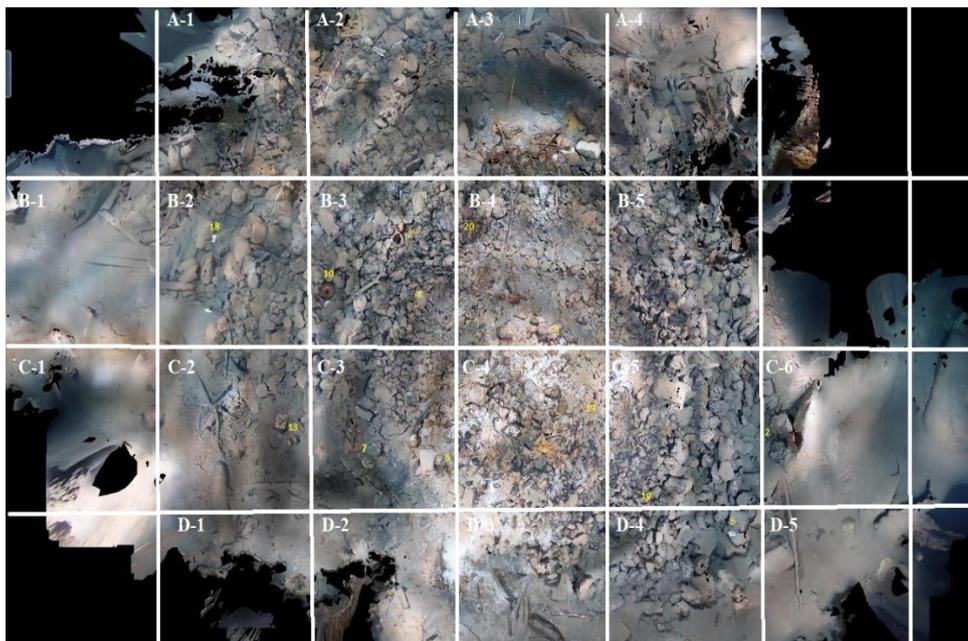


**Figura 152.** Imágenes de la cueva sumergida de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Imagen de la escollera sumergida en el interior de la cavidad de la Font de Ses Aiguades formando el cono de escombros donde hay material arqueológico dentro de la campaña del año 2020. (Foto; Autor). **2.** Restos cerámicos sumergidos recuperados en la campaña de 1998 encabezada por Francesc Gràcia. (Foto; Francesc Gràcia). **3.** Espeleo-buceador recuperando un ánfora de la parte inferior del cono, donde abunda el limo, en la campaña de 1998. (Foto. Francesc Gràcia). **4.** Imagen de la topografía de la cueva adaptada a hipótesis. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001).

Es muy difícil verificar una hipótesis histórica reciente tan solo a través de una contextualización de los hechos acaecidos durante el siglo XIX, pero ciertamente las evidencias nos muestran un cambio de 180° en las teorías arqueológicas

esgrimidas hasta ahora, donde se creía que la caída de las ánforas ladera abajo del montículo de escombros fue lo que provocó la máxima concentración de material arqueológico alrededor del cono y en las partes más profundas (Colom y Járrega, 2020, 2018; Gràcia et al., 2001).

A partir de los datos que se presentan en este trabajo, consideramos que debajo de los miles de toneladas de rocas, escollera y sedimento, podría haber todavía restos cerámicos. Como se ha comentado, esta hipótesis podría ser confirmada con un análisis geológico cotejando la escollera del puerto de Alcudia con el material que hay en el interior de la cueva, aunque parece obvio que debe ser el mismo. Actualmente las únicas zonas fértiles de la cavidad se concentran en la parte W y SW del cono en su zona más profunda, exactamente en los sectores B-1, B-2, C-1, C-2 y D-1 siendo ésta la zona con peor visibilidad de la cavidad (Fig. 153).



**Figura 153.** Visión cenital del yacimiento con los números de las piezas geo posicionadas y dividida de forma esquemática mediante cuadrículas. Fuente; Adaptación de la fotogrametría de John Kendall para el Proyecto IASCM 2020.

Debemos comprender la importancia del yacimiento mediante un estudio global de la cavidad, no solo a través del análisis arqueológico de los restos cerámicos del interior de la cavidad sino por todo su contexto. Este es un propósito y un objetivo que debe continuar, ya sea por éste o por otros proyectos futuros, ya que las metodologías prospectivas coyunturalmente solo pueden llegar hasta un cierto punto, dejando para un futuro las preguntas que no hayan tenido respuesta. Solo de esta manera conseguiremos conocer más sobre la propia cavidad y sobre las primeras cronologías de pobladores que utilizaron el agua del pozo de la cova de la Font de Ses Aiguades (Calvo *et al.*, 2011; Marlasca y López, 2014).

### **8.1.7. La cova Genovesa o d'en Bessó**

#### *8.1.7.1. Interpretación metodológica*

La cova Genovesa o d'en Bessó es una de las cavidades más estudiadas y concurridas de la isla de Mallorca a causa de su fácil accesibilidad terrestre, ya que su entrada se encuentra a escasos metros de una vía pública. Por otro lado, es una cueva compleja, con multitud de galerías sumergidas con restricciones y pasos estrechos que complican la navegación y dificultan el movimiento. Es por este motivo por el que se decidió realizar tan solo la prospección visual lineal primaria y secundaria, con tres espeleo-buceadores en dos turnos, dos en línea y un tercero de seguridad, siempre con un arqueólogo subacuático en el equipo.

##### *8.1.7.1.1. Valoración de los resultados topográficos*

El geoposicionamiento de una localización concreta ya sea de interés paleontológico, arqueológico o de otro orden no es una cuestión baladí puesto que para lograr conseguir la correcta ubicación de un punto interno en una cavidad sumergida deben ser muchos los factores a tener en cuenta. Uno de los factores que tenía que mejorar el trabajo en la cova Genovesa era la coordenada inicial,

cosa que se ya se había realizado en todas las otras cuevas prospectadas en la campaña de campo del año 2020.

Para la consecución de la coordenada de inicio debíamos preguntarnos, ¿qué margen de error o que tolerancia topográfica estábamos dispuestos a permitir? En nuestro caso, sabíamos que un pequeño error de un metro en la medición inicial de una poligonal ya sea manual o realizada por un dispositivo de mapeo, se podía convertir en un error exponencial a medida que avanzábamos en la lectura y nos adentrábamos en la cavidad, con el agravante que eso conllevaba. Esto que parece inimaginable en la arqueología terrestre ha sido banalizado e incluso descartado en el estudio metodológico topográfico de las cuevas inundadas, pero cuando se trata de auxiliar a un posible espeleo buceador atrapado, perforando por ejemplo una vía de socorro en el terreno, nos damos cuenta de cuan necesario es una topografía rigurosa<sup>104</sup>. Los accidentes en cavidades sumergidas son frecuentes y dadas las condiciones de trabajo y la dificultad de movilidad pueden conducir a desenlaces fatales para el espeleo-buceador (Buzzacott *et al.*, 2009; Potts, Buzzacott y Denoble, 2016). Es por esta razón por la que en nuestro estudio el único margen de error tolerable era el centimétrico, puesto que cualquier baremo superior a esta premisa era completamente descartable.

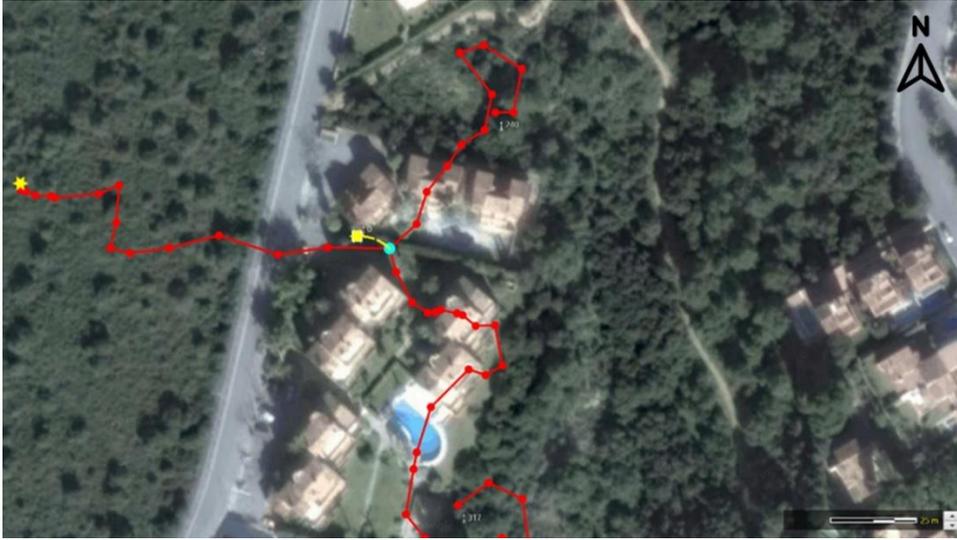
Por un lado, el gran avance de los trabajos topográficos realizados en la cova Genovesa vino gracias a la consecución de la coordenada inicial obtenida por GPS diferencial y la cesión de datos por parte de Alvaro Granell, con la lectura completa del hilo guía conseguida por su MNEMO. Ambas cosas reubicaron espacialmente la topografía de la cueva respecto a la superficie terrestre, permitiendo generar nuevas hipótesis históricas y arqueológicas (Fig. 154).

Por otro lado, la parte negativa vino por la falta de la recepción de la señal del emisor del dispositivo de radiolocalización, debido a que ésta se buscaba en un lugar erróneo. Así, casi veinte años después del primer estudio topográfico de la cueva, y tras verificar los datos con diferentes dispositivos de mapeo, pudimos corroborar que la Sala de los Myotragus, según las coordenadas del ARIANE, se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 31N, X: 527165.7, Y: 4375130, la

---

<sup>104</sup> <https://www.diariodemallorca.es/sucesos/2017/04/17/emergencias-opcion-pensar-xisco-gracia-3427530.html>

cual estaría a 10 metros de la estación número 16 del MNEMO, cerca de la bifurcación entre la Sala Bermudacaris y la Galería dels Poliquets, siendo ésta la única parte de la cueva donde todavía se conservan in situ restos óseos de este caprino extinto.



**Figura 154.** Ortofoto del área donde se encuentra la cova Genovesa, en la cual se puede observar el trazado del MNEMO (línea roja), la entrada a la cueva (estrella amarilla) y la ubicación de la pequeña Sala de los Myotragus (cuadro amarillo). Esta sala, según las coordenadas obtenidas del ARIANE, se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 31N, X: 527165.7, Y: 4375130. Fuente; elaboración propia.

#### 8.1.7.1.2. Valoración de los resultados fotogramétricos obtenidos

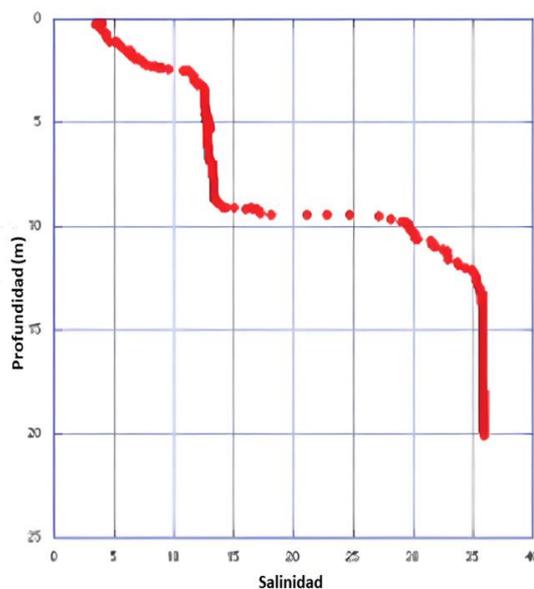
Tras la pésima fotogrametría obtenida del muro sumergido en la campaña del año 2019, a causa de un material técnico insuficiente y una falta de iluminación del área de trabajo, se decidió contar con la experiencia y equipo técnico de John Kendall, en la campaña de 2020, lo cual nos permitió conseguir un modelo 3D completo. Su experiencia en la toma fotográfica fue directamente proporcional a un ahorro de tiempo en la medición y documentación del muro. La técnica de trimado, fundamental para no levantar sedimento en suspensión, la buena iluminación de la cámara y la experiencia previa, junto a unos condicionantes físicos como la claridad y temperatura óptimas del agua, permitieron conseguir un

modelo fotogramétrico óptimo (véase capítulo 7.4.4.3.). La posibilidad de renderizar el modelo con la última versión del Agisoft Metashape Professional y difundir los resultados a través de plataformas como Dronelab y Constructed permitió también avanzar rápidamente en la consulta y valoración de los datos obtenidos (Figs. 106, 107, 108, 109 y 110).

#### 8.1.7.1.3. Valoración de la seguridad e higiene del agua

Uno de los objetivos de nuestra investigación fue el análisis del agua por tres motivos diferentes; I) corroborar la higiene del agua, evitando cualquier tipo de contaminación que pudiera poner en peligro la seguridad de los buzos, II) conocer la potabilidad del agua para el uso como punto de aguada tanto en la actualidad como en el pasado y III) saber las condiciones intrínsecas del agua que conservan los restos arqueológicos y paleontológicos.

En esta ocasión pudimos acudir a los estudios y publicaciones previas, en los cuales se realizaron diversas analíticas del agua de la cueva (Gràcia, 2003).



**Gráfico 12.** Perfil de Salinidad (%) en la Sala de Entrada. La gráfica nos muestra como en los primeros metros de profundidad el agua tiene un carácter salobre, el cual va aumentando a medida que ganamos en profundidad. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2003).

Así, consultando la bibliografía de Gràcia (2003), vemos que el régimen térmico y de salinidad de las aguas de la cova Genovesa fueron estudiadas mediante una sonda oceanográfica AANDERAA perteneciente al Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA). Gracias a este dispositivo lector CTD se supo que la cova Genovesa es un ejemplo típico de cueva de anquihalina<sup>105</sup>. El aislamiento del entorno hace que la columna de agua de la cueva sea muy estable mecánicamente, ya que ni las olas ni los vientos la afectan. La cueva tiene una estratificación permanente, con una capa superficial de espesor variable de agua fresca o ligeramente salobre que fluye sobre una masa de agua marina más densa, la cual ocupa las partes profundas. El cambio de agua dulce a marina a lo largo de la columna de agua se produce en una zona de transición (mezcla) llamada picnoclina a los 9 metros de profundidad (Gràcia *et al.*, 2003).

El agua superficial tiene una inferencia salobre, es decir una salinidad alrededor del 4 ‰, aunque inmediatamente a continuación encontramos una picnoclina superficial desarrollada entre -1 y -3.5 metros donde el agua llega a un 13.5 ‰ de salinidad. Por debajo de este nivel la salinidad del agua se mantiene estable hasta los 9 metros de profundidad. Esta capa de agua situada entre -3.5 y -9 metros es una de las dos masas de agua características en la cavidad. De -9 a -13 metros se desarrolla una segunda picnoclina, hasta que el agua llega a alcanzar salinidades casi marinas (36 ‰) (Gràcia, 2015).

#### 8.1.7.2. Interpretación histórica y arqueológica

Sin lugar a duda, el dato que arqueológicamente llama más llama la atención de la cova Genovesa es su muro ciclópeo sumergido y su rampa empedrada. Cronológicamente la arquitectura ciclópea en Mallorca es propia de dos periodos culturales, el primero es el de las navetas y después el de la época talayótica. Concretamente, los materiales cerámicos han servido a distintos autores para sugerir que estas construcciones ciclópeas de la cova Genovesa se podrían situar

---

<sup>105</sup> Las cuevas anquihalinas son cavidades de agua salobre o totalmente marina costeras, por tanto, no presentan una conexión directa al mar abierto. El término anquihalino procede del griego anchialos, que significa precisamente “próximo al mar”.

en la fase final de la época de las navetas (García Rosselló, Calvo Trias y Albero Santacreu, 2008; Pérez-Juez, Goldberg y Cabanes, 2011; Picornell, 2012).

Además, debemos mencionar otras dos cuevas que presentan construcciones ciclópeas en Mallorca, no relacionadas con prácticas funerarias, que se sitúan en la zona costera del término de Manacor, a escasa distancia de la cova Genovesa. Estas cuevas son; la cova des Moro (Trias, 2000) y las coves del Drach (Gusó, 1995). En la entrada de la cova des Moro también hay un corredor ciclópeo cubierto con grandes losas. Las primeras campañas de excavación en esta cavidad pusieron de manifiesto que el grueso del material cerámico también pertenecía a la última fase cultural de las navetas de habitación. Y, por último, en las coves del Drach también nos encontramos un corredor ciclópeo cubierto, cerca de la entrada natural (Gràcia *et al.*, 2003).

#### 8.1.7.2.1. Contextualización histórico territorial de la cavidad

Cuando pensamos en las peculiaridades de la cova Genovesa siempre nos preguntamos; ¿por qué se han encontrado estos restos óseos dentro de salas anegadas en la zona interior de la cueva? Pues tal como explica los autores que han investigado con anterioridad la cavidad (Gràcia *et al.*, 2003), es relativamente común encontrar restos de *Myotragus balearicus* en el interior de las cavidades. Hasta ahora, se han contabilizado unas 160 cavidades de las Gimnesias donde se han encontrado restos de *Myotragus balearicus* (Cuerda, 1966; Guerrero, 1996; Bover y Ramis, 2005; Palombo *et al.*, 2006). La densidad de huesos encontrados en la cova Genovesa y su ubicación distante a la entrada sugiere que la cavidad actuó como una trampa natural de una manera similar a lo que sucedió en la cova des Penyal Blanc en la isla de Cabrera (Alcover, Font y Trias, 1997), cuando el nivel marino era más bajo que el actual y los animales podían entrar en la cueva.

Respecto a los restos de *Myotragus balearicus* encontrados en la cova Genovesa, podemos plantearnos diversas hipótesis sobre cómo habrían llegado hasta allí, ya fuera por una entrada actualmente oculta por la vegetación actual, por una posible entrada cegada a causa de un derrumbe o quizá simplemente por el hecho de que

los animales entraban dentro de la cavidad y una vez dentro de la galería, ubicada en el pasaje anterior a la Galería dels Myotragus, se quedaban atrapados sin poder salir. Quizá la causa más probable fuera la existencia de un gran desnivel que actuaba en forma de gran peldaño de escalera, pues sólo a partir de ese punto es donde se encuentran el gran número de huesos de la especie (muchos de ellos en conexión anatómica), a veces acumulados en áreas donde no es posible que fueran arrastrados por el agua o por los sedimentos, como los que se encuentran en la sala lateral de pequeñas dimensiones. Por lo tanto, parece posible que, después de caerse, debido a la falta de visibilidad, el gran peldaño actuara como barrera infranqueable para que volvieran a salir los animales de pequeño tamaño. Se desconoce la razón por la que estos animales penetraron en la cavidad, pero las hipótesis más plausibles son la búsqueda de agua y de refugio (Gràcia *et al.*, 2003). Además, no debemos olvidar que gran parte de los caprinos utilizan habitualmente las cavidades como refugio (Bellés, 1987; Alcover y Ramis, 2004).

Es por esta razón, por la que una vez más acudimos a los mapas históricos del Instituto Geográfico Nacional (IGN) para intentar comprender como era el terreno donde se ubicaba la cueva antes de la construcción de la urbanización de la cala. Observando el mapa histórico de 1953, en principio se descarta la existencia de alguna entrada secundaria oculta por la vegetación o por la construcción de edificaciones o por la pavimentación de las calles de la Cala Mendia y Cala Anguila (Fig. 155). De este modo, lo razonable es pensar que los *Myotragus balearicus* accedieron a la cavidad por la entrada principal, la misma que la actual, introduciéndose en ella hasta encontrar el nivel freático de la cueva que, probablemente, hace 5000 años estaba a casi 200 metros de la entrada actual (Guerrero, 1996; Gràcia *et al.*, 2003; Bover y Ramis, 2005; Palombo *et al.*, 2006) (Fig. 156).



**Figura 155.** Ortofotomapa histórica en blanco y negro del año 1953 donde podemos observar la Cala Anguila sin urbanizar y con una única entrada a la cova Genovesa (flecha blanca). Fuente; IGN.



**Figura 156.** Ortofotomapa actual donde podemos observar el cambio urbanístico que ha sufrido Cala Anguila y Cala Mendía alrededor de la entrada de la cova Genovesa (pincho amarillo). Fuente; Google Earth.

#### 8.1.7.2.2. *El estudio paleontológico de la cavidad*

La cova Genovesa conserva importantes restos paleontológicos, los cuales fueron analizados previamente (Gràcia *et al.*, 2003). En estos trabajos realizados a comienzos de este siglo, se estudió la distribución espacial de una gran cantidad de ejemplares de *Myotragus balearicus*, algunos situados en ubicaciones muy distantes de la entrada. Este hecho ocasionó una importante dificultad en explicar esta distribución, especialmente en el caso de que la cueva siempre hubiera tenido únicamente la entrada actual, ya que estos individuos provenían de un ciclo climático frío, posiblemente del final del último estadio glacial (MIS 4 a 2), época en la que el nivel del mar y el de las aguas subterráneas era inferior al actual y la cueva permanecía seca (Guerrero, 1996; Gràcia *et al.*, 2003).

El hecho más llamativo es que hace veinte años, cuando se realizaron las primeras exploraciones, la cavidad se encontraba casi en un estado virgen puesto que los huesos de *Myotragus balearicus* estaban diseminados por la superficie de la galería que lleva su nombre y por otras partes de la cueva, alejadas de la entrada de ésta. En cambio, en la campaña de 2020, exceptuando la pequeña cámara donde se encontraron todavía los remanentes óseos localizados el año 2003, no quedaba ni un solo hueso y ni un solo fragmento de cerámica en ninguna parte de la cavidad, lo que nos indicaba que la cavidad ha padecido un importante expolio en estas dos últimas décadas (Sánchez, 2013; Morales, 2015; Marín y Sanjuan, 2018).

#### 8.1.7.2.3. *Hipótesis histórica*

El hecho de no realizar finalmente un análisis sedimentológico para documentar indicadores de actividad antrópica nos cerró la posibilidad de conocer la existencia de posibles indicadores antropogénicos (Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021). De todos modos, dos son las principales hipótesis del uso de la cavidad por parte de los grupos humanos del pasado; I) como un posible punto de aguada y II) como un lugar ceremonial a modo de posible santuario (González, 2002; Ramis y Santandreu, 2011; Marlasca y López, 2014). Esta última hipótesis

podría encajar con los casos de las cuevas de Mussol y des Càrritx (Lull *et al.*, 1999) y de sus posibles paralelos mallorquines como la cova des Moros (Trias, 2000). Es conocido que durante el momento de apogeo de las construcciones de las navetas se llevaron a cabo ceremonias y rituales en cavidades subterráneas situadas en barrancos cercanos al mar. Estas prácticas se han relacionado con el culto a la tierra, a cuyo interior se accedería, simbólicamente, a partir del uso de estos espacios de cueva profunda sin incidencia de luz natural y situadas en zonas de paso o fronteras de carácter metamórfico simbolizadas por el contacto entre la tierra y el mar (Picornell, 2012). En el caso del uso como punto de aguada, los análisis previos indican la alta salinidad de la cavidad, en este sentido, si las condiciones del pasado fueron las mismas que en la actualidad, es lógico pensar que esta cavidad difícilmente pudiera haber servido como punto de aguada.

## 8.2. DISCUSIÓN SOBRE LOS OBJETIVOS

Dentro de un contexto metodológico, los objetivos principales y fundamentales que se han pretendido llevar a cabo en los diferentes casos a estudio expuestos en esta tesis han sido cumplidos de una forma notoria, llegando incluso en determinados momentos a superar las expectativas marcadas en las premisas previas de los proyectos prospectivos realizados. Es cierto, que las primeras prospecciones carecieron de un método claro de intervención y de una financiación adecuada para realizar pruebas técnicas en el interior de las cavidades. En ocasiones, la escasa bibliografía provocó intervenciones prospectivas basadas en el “ensayo y error”, siendo ésta la tónica dominante al no existir precedentes metodológicos previos publicados en artículos científicos en los cuales pudiéramos basar nuestro trabajo. Por ejemplo, uno de los errores metodológicos, a nuestro entender más importantes, es el seguido por la gran mayoría de proyectos arqueológicos subacuáticos que actualmente se realizan en muchas cavidades y es el de dar validez del método topográfico de recuento de nudos (García, 2014; Huber, 2014; Barba Meinecke, 2020). Esta práctica aplicada a la cuenta de nudos en una línea guía desde el punto inicial del hilo sumergido hasta el objetivo marcado presenta una alta subjetividad en la toma de distancias y

en el acimut. Esto es debido a que no se contempla la declinación magnética (Dm) y no existe posibilidad de comparación o cotejación externa con otras técnicas, lo cual hace que no pueda considerarse un método topográfico riguroso ni probablemente acertado, sobre todo en distancias muy largas donde se pueden acumular un gran número de errores debido a la cantidad elevada de estaciones o puntos de control intermedios, sin contar los posibles errores en la radiación y en la trilateración. Ese error influye en la generación de una base de datos real, que permita la ubicación espacial del yacimiento y el geoposicionamiento de los restos arqueológicos, con una tolerancia topográfica mínima o nula. Además, genera incertidumbres respecto a si el yacimiento ha sido o no expoliado, sobre todo en yacimientos sumergidos de difícil acceso o diseminados en un área de extensión considerable. Además, sabemos que una topografía errónea imposibilita la correspondencia del yacimiento sumergido respecto a la superficie terrestre, lo cual permitirá la generación de hipótesis históricas erróneas sobre cómo llegaron hasta allí los artefactos arqueológicos sumergidos encontrados (García, 2014; Barba Meinecke, 2020; Fumás, 2022b).

### **8.2.1. Objetivos alcanzados**

Para tratar de contextualizar el correcto desarrollo de la práctica prospectiva generada, pasamos a enumerar los principales objetivos alcanzados en los diferentes trabajos de prospección materializados; I) se ha desarrollado un método de trabajo en las cuevas sumergidas dentro de la zona territorial interior y costera que es extrapolable a cualquier tipo de cavidad sumergida, II) se han interrelacionado las topografías de las cuevas sumergidas con los yacimientos arqueológicos terrestres circundantes a la zona de estudio, especialmente con las cuevas terrestres que han registrado una ocupación prehistórica confirmada, III) se ha desarrollado un estudio de gabinete, previo al trabajo de campo, mediante la investigación y contextualización del terreno y del paisaje, IV) se ha considerado la investigación previa llevada a cabo por otros proyectos nacionales e internacionales y se ha importado todo este conocimiento al estudio prospectivo de las cuevas a estudio, utilizando todas las herramientas técnicas y metodológicas

que pudieran ser útiles para mejorar su observación, su documentación y su preservación, V) se han estudiado los modelos de inundación, sedimentación y cimentación de los materiales sumergidos para entender la estratificación de sus depósitos a través de la extracción de muestras, tanto en trabajos previos realizados por otros equipos de investigación (cova Genovesa y cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou) como por trabajos propios (cova del Gegant, cova de la Falconera, cova des Drac de Santanyí y cova de la Font de Ses Aiguades), aunque en ninguna de ellas se ha llevado un estudio analítico sedimentológico (Gàmez, 2007; Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021), VI) se ha colaborado con otros equipos de investigación en cuevas sumergidas que trabajan con metodologías similares con el objetivo de aprender nuevas técnicas de prospección, excavación y conservación, VI) se ha averiguado qué tipo de prospección específica es más útil y segura, dependiendo de la cavidad en la que se pretende llevar a cabo el estudio prospectivo, eligiendo entre prospecciones visuales (primaria, secundaria, terciaria, pendular, etc.), con topografía manual (triangulación, eje cartesiano, cuadrícula, etc.), topografía instrumentalizada (MNEMO, SEACRAFT, ecosonda, radiolocalización, GPS, etc.) y documentación *in situ* (fotogrametría, fotografía, vídeo, etc.), VII) se ha consultado la topografía previa de cada uno de los yacimientos arqueológicos de las cuevas sumergidas a estudio, VIII) se ha almacenado de toda la información en una base de datos, realizando hojas de control de todas las intervenciones realizadas y aplicando en su mayoría técnicas en Sistemas de Información Geográfica (SIG), IX) se han estudiado las técnicas propias de prospección directa, con el objetivo final de conseguir una valoración objetiva sobre su utilidad, efectividad y coste en el trabajo de campo, primando la eficacia de los resultados, y primando la máxima brevedad posible en su ejecución, debido a las difíciles condiciones físicas en el interior de las cavidades sumergidas (percolación, baja o nula visibilidad, posible rotura de hilo guía, falta de aire, pérdida de orientación, haloclina, enfermedad descompresiva, narcosis y bajas temperaturas), X) se ha usado la ciencia topográfica como único recurso fiable y riguroso para la consecución de un geoposicionamiento de puntos real tanto en superficie como en el interior de la cavidad (ya sea en la zona emergida como sumergida), XI) se han confeccionado una serie de mediciones radiales viables, siempre y cuando se disponga de una coordenada verídica que nos permita generar cálculos trigonométricos manuales o modelos extrapolables a la

topografía dentro de una tolerancia asumible, XII) se han creado una serie de proyectos atractivos en su difusión y divulgación tanto para el público académico formado en arqueología como para el público en general, XIII) se han generado proyectos que sepan tanto responder a preguntas arqueológicas como originar nuevas preguntas e hipótesis históricas sobre la funcionalidad y uso antrópico de las cavidades sumergidas, XIV) se ha elaborado un plan de investigación, proyectos y finalmente unas memorias sobre técnicas de prospección que intentan fusionar el mundo académico, el profesional y el deportivo en una amalgama y diversidad formada por un equipo humano, técnico y logístico innovador y multidisciplinar que sirva de referencia para otros proyectos en cavidades sumergidas alrededor del mundo y XV) por último, los objetivos secundarios de los diferentes proyectos prospectivos mencionados han tenido como objetivo fundamental crear una metodología de trabajo rápida, eficaz y respetuosa con la fragilidad del entorno. Esta nueva metodología de trabajo se ha logrado o al menos mejorado respecto a la usada en la actualidad, lo cual permitirá mejorar, tanto cuantitativa como cualitativamente futuras investigaciones arqueológicas en cavidades sumergidas, gracias a la experiencia adquirida a lo largo de estos años de trabajo de campo, en los que se han definido unos criterios claros de actuación que han podido ser corroborados como válidos. De este modo, la repetición de inmersiones y pruebas técnicas y científicas ha hecho posible una reflexión sobre qué tipo de metodología es la más adecuada en este ámbito, facilitando así la forma de proyectar nuevos pasos hacia una prospección más segura, rápida, efectiva y respetuosa con el frágil medio subacuático de las cuevas cársticas sumergidas.

### 8.3. DISCUSIÓN HISTÓRICA

Todos los restos arqueológicos encontrados en el interior de las salas de colapso y en las entradas sumergidas de las cuevas estudiadas guardaban una relación directa con la cavidad como puntos de abastecimiento de agua potable, tanto para el ganado como para el consumo humano. Esto invita a compartir una reflexión, realizada previamente por otros investigadores, sobre todo en el uso del espacio y del territorio por parte de las comunidades prehistóricas de Mallorca (Calvo,

2009) en la búsqueda de abastecimiento de recursos naturales y marinos (Marlasca y López, 2014), puesto que en esta isla hay una escasez importante de recursos hídricos en superficie, un condicionante importante que seguramente afectó la movilidad de las comunidades pasadas (Guerrero, 1996). Por otro lado, desde la perspectiva arqueológica, la identificación de antiguos poblados talayóticos, cerca de los diferentes puntos de colapso de la cavidad, nos permitió abrir diferentes hipótesis sobre el uso del agua de la cavidad durante el funcionamiento de éstos, como punto de aguada de los antiguos pobladores. Con el fin de verificar estas hipótesis, se debería obtener paralelos entre las cerámicas encontradas en la parte subacuática de la cavidad y la que se encontraba en los poblados circundantes de la misma (Gi y Rossell, 1963; Rodríguez Alcalde, 1995).

De este modo, y tal y como se presenta en este trabajo, la hipótesis de la existencia de una red de puntos de aguada en las distintas islas del Mediterráneo pudo haber sido un acontecimiento importante en el pasado y pudo también haber contribuido a condicionar las largas rutas de navegación (Marlasca y López, 2014). Distintos ejemplos de cavidades con las mismas funciones sería la mencionada la cova des Moro de Sa Dragonera (Ginés y Ginés, 2010) la Gruta de Kapikaya en el Peloponeso (Campbell, 2016), la cova de les Cendres (Teulada-Moraira, Alicante) (Bernabeu y Molina Balaguer, 2011) o la cova dels Coloms (Altea, Alicante) (González, 2002) entre otras, aunque la más relevantes sin duda son las cuevas mallorquinas, como; las cuevas de Mussol y des Càrritx (Lull *et al.*, 1999), la cova des Drac des Rafal des Porcs (Deyà, Colom y Gràcia, 2022) y la cova de la Font de Ses Aiguades (Gràcia *et al.*, 2001; Colom y Járrega, 2018, 2020; Fumás *et al.*, 2022).

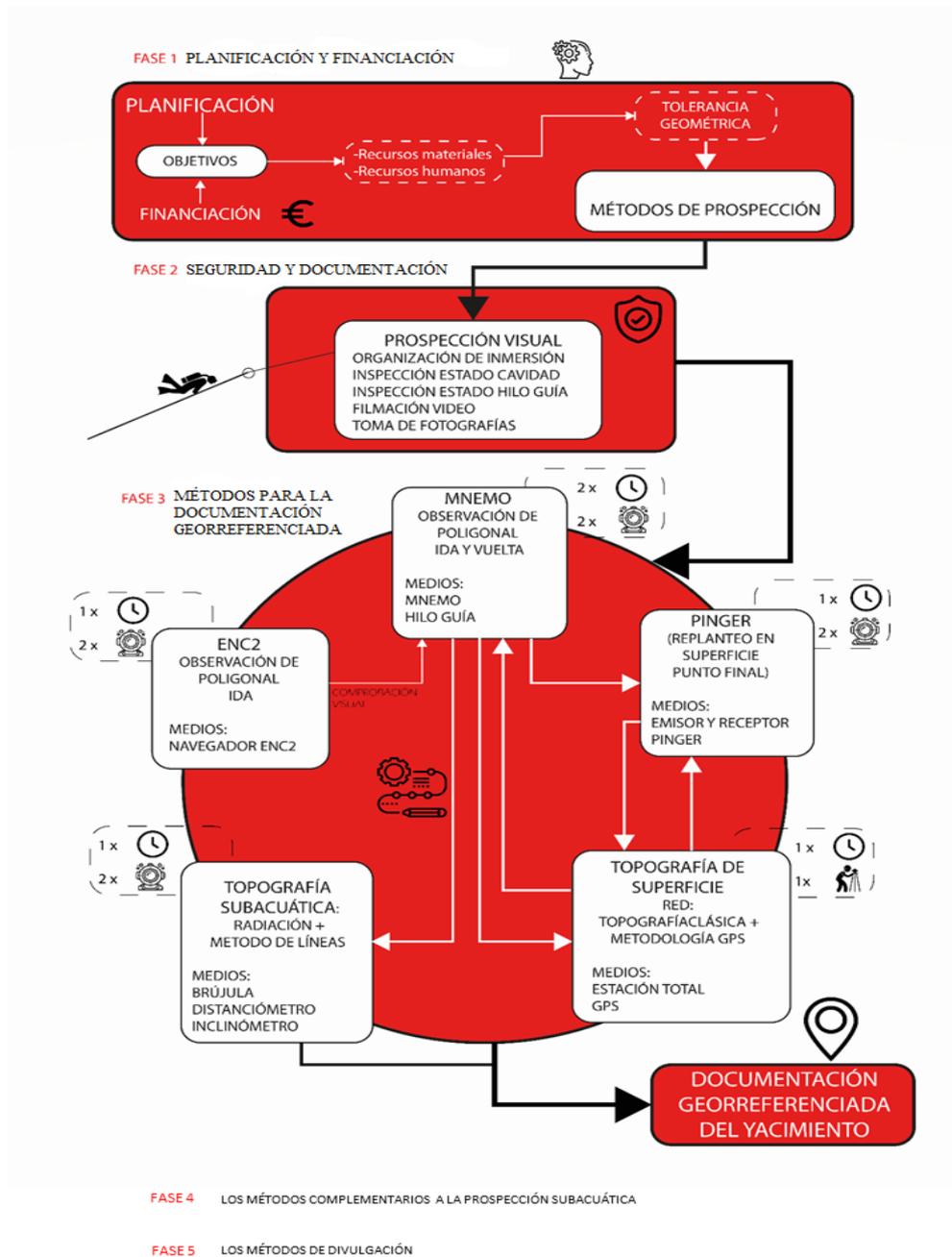
También debemos ser conscientes de la importancia de las cuevas litorales en el mundo de la religión, de la divinidad y la simbología de los antiguos navegantes. Algunas cuevas de las islas de Mallorca como la cova Rotja (Guerrero, 1985; Hernández, 2009) o de Menorca, como la cova des Mussol (Lull *et al.*, 1999) o las cuevas de la cala Cales Coves (Meliá, 1982; Gornes, 1996; Castelló, 2005; Ramis y Santandreu, 2011; Pons, Baratta y Mayer, 2013), fueron lugares de devoción y culto donde navegantes y pobladores autóctonos pudieron practicar la oración o los ritos específicos de cada lugar.

#### 8.4. DISCUSIÓN Y SINTESIS METODOLOGICA

La presente tesis ha tenido un desarrollo y evolución de siete años donde se ha contado con la opinión y conocimiento de multitud de profesionales de diferentes ámbitos de la investigación. De este modo, se ha tratado de elaborar un catálogo de cuevas diverso y heterogéneo donde las características diferentes de cada una de las cavidades abrían nuevos retos técnicos que no siempre fueron fáciles de solventar. El trabajo experimentado y expuesto nos ha permitido generar una planificación prospectiva empírica, extrapolable a cualquier cavidad cárstica sumergida, gracias a la composición y correlación de las diferentes metodologías de campo y gabinete. De esta manera, se ha conseguido tanto el levantamiento georreferenciado de propio yacimiento como las coordenadas que definen el trayecto desde la entrada a la cavidad hasta el punto donde se encuentra ese yacimiento sumergido, como la posterior documentación del sitio arqueológico.

Uno de los grandes errores en la planificación de un proyecto pasa por creer que el trabajo comienza al sumergirse dentro de una cavidad inundada. La experiencia nos ha enseñado que son muchos los pasos previos que debemos dar para gestionar un proyecto arqueológico en una cueva sumergida, siempre acorde a la ley estatal y autonómica y rigiéndonos por unas premisas de actuación donde la seguridad e higiene de los intervinientes sean prioritarias. Otro gran error es menospreciar o infravalorar el coste humano, logístico y económico de un proyecto. Es importante conocer el terreno, a los equipos de investigación que han trabajado previamente, a los espeleo-buceadores que han topografiado manualmente la cavidad y consultar a los propietarios de los terrenos donde se encuentran las cavidades para solicitar autorización formal de paso y uso. Pero sin duda, una de las recomendaciones más importantes que debemos tener en cuenta, y que iremos desgranando en las siguientes líneas, es la necesidad de contar con un presupuesto económico real y con unos medios de financiación válidos. Estos no suelen ser bajos ya que ciertas disciplinas como la radiolocalización, la fotogrametría, o el uso de un AUV en cavidades sumergidas confinadas requiere de profesionales específicos que trabajen bajo un protocolo de actuación claro. Cualquier atajo en esta materia resulta contraproducente ya que la experiencia previa es primordial para la consecución de resultados óptimos.

Por esta razón, se adjunta un organigrama metodológico de las fases a realizar para la obtención de resultados óptimos en la consecución de un proyecto arqueológico prospectivo riguroso en cavidades sumergidas (Fig. 157).



**Figura 157.** Organigrama metodológico de las cinco fases a realizar para la obtención de resultados óptimos en la consecución de un proyecto arqueológico prospectivo riguroso en cavidades sumergidas. Fuente; (Fumás, 2022b).

La resolución adecuada a efectuar en cualquier intervención prospectiva arqueológica pasa inexorablemente por el seguimiento de una secuencia de trabajo dividida en diversas fases de ejecución. Estas fases van desde la planificación previa de los objetivos marcados hasta la difusión del proyecto a nivel general. A continuación, y basándonos en la experiencia adquirida, enumeraremos estas fases ineludibles en la generación y mejora de un proyecto arqueológico prospectivo con dispositivos y herramientas de última generación. Para ello, también, deberemos dividir nuestra concepción en diferentes ramas o caminos, dependiendo de la casuística concreta del proyecto, a través de distintos y complementarios estudios de viabilidad que deberemos dividir en cuatro fases. Estas fases son;

#### **8.4.1. Fase 1. Planificación del proyecto**

##### *8.4.1.1. Objetivos*

La concepción general, cuando se afronta un proyecto de las características tan complejas como una prospección arqueológica subacuática en una cueva sumergida debe hacernos reflexionar sobre qué objetivos concretos pretendemos alcanzar en nuestra investigación. Solo entonces, tras el desarrollo de la idea inicial pueden comenzar a desgranarse la planificación concreta de la intervención dependiendo de las características concretas de la cavidad y del yacimiento arqueológico a prospectar.

##### *8.4.1.2. Planificación*

Tanto o más que la importancia del trabajo de campo es la planificación de esos mismos trabajos hacía la consecución de los objetivos marcados. Tan solo a través de una planificación exhaustiva en los tiempos de ejecución de las tareas y en la confianza depositada sobre las responsabilidades individuales de cada uno de los miembros del equipo humano a cargo de esas tareas podremos disminuir el

número de incidencias que, de por sí, se generaran al efectuar la prospección planificada. En nuestro caso, y con la intención de minimizar el riesgo en la aparición de esos problemas o incidencias no esperadas realizamos la planificación con Microsoft Planner<sup>106</sup> debido a la gran cantidad de pruebas técnicas planteadas en los diferentes proyectos mencionados anteriormente. Además, en la planificación de proyecto arqueológico debemos tener presente la normativa legal vigente y solicitar el permiso correspondiente a la instancia administrativa que corresponda tanto en materia de medio ambiente, patrimonio, costas y propiedad particular.

Por último, será necesario la generación de un presupuesto real con un desglose específico de todos los conceptos necesarios y con el importe de cada una de las cantidades.

#### 8.4.1.3. Financiación

Sin duda, la financiación siempre es el escollo más importante al que debe hacer frente un proyecto científico. Este tipo de ayudas económicas pueden llegar con anterioridad o con posterioridad a la realización del proyecto, siendo más habitual lo segundo. La recomendación comúnmente establecida es la tenencia de un remanente económico previa a la campaña de trabajo para el pago de proveedores, logística y transporte. En nuestro caso, por ejemplo, solo se consiguió financiación pública europea para el Proyecto Falconera y tan solo para los gastos destinados a la manutención y lectura de datos del equipo de CIRS (véase capítulo 6.3.1.). El resto de los proyectos solo se pudieron realizar desde la autofinanciación o desde la micro financiación o crowdfunding<sup>107</sup>, siendo ésta último la opción menos indicada si los gastos y sobrecostos del proyecto son elevados.

---

<sup>106</sup> Planner Office 365 es una aplicación que permite administrar planes de trabajo, lo cual permite con facilidad asignar de manera organizada diferentes actividades que se tendrán que realizar para cumplir con un plan, la fecha de entrega, así como el o los responsables de llevarla a cabo.

<sup>107</sup> <https://crowdfunding.hispanianostra.org/proyecto-iascm/2369>

Normalmente, los proyectos de investigación se financian mediante convocatorias de concurrencia pública y no siempre se logran. Es completamente inverosímil la generación de un proyecto científico sin el respaldo económico de una entidad pública o privada que apoye la resolución de éste. La recomendación en este aspecto es meridianamente clara en la imposibilidad de generar un proyecto con garantías sin el compromiso de las administraciones.

#### *8.4.1.4. Recursos materiales (aire, CCR, scooter, dispositivos electrónicos, etc.)*

Desde una visión general y marcadas las pautas de intervención de los diferentes objetivos a cumplir en los diferentes proyectos, debemos esgrimir los diferentes razonamientos en la opinión de uso realizado por los diferentes recursos materiales emprados en los trabajos de campo.

##### *8.4.1.4.1. Gases*

Todas las intervenciones subacuáticas realizadas solo necesitaron de una mezcla de aire normal debido a la poca profundidad de las cuevas, lo cual no hacía necesario utilizar mezcla de gases como el heliox o el trimix para reducir el porcentaje de nitrógeno de la mezcla y, de ese modo, reducir el tiempo de descompresión del buceador.

Por otro lado, sí que fue necesario la incorporación de tanques supletorios o complementarios en la configuración de buceo individual de cada buceador ya que, aunque respetando la regla de los tercios, debíamos tener una postura conservadora en este aspecto en lo que se refiere al almacenamiento de gas en caso de emergencia, obstrucción o pérdida de hilo de cualquier miembro del equipo de inmersión.

Nuestra recomendación en este aspecto pasa, siempre que el factor económico lo permita, en el uso de una configuración que permita disponer de la máxima capacidad de gas en la configuración del equipo del buceador. Esto aumentará la posibilidad de hacer inmersiones más largas y complejas y reducirá las

posibilidades de quedarnos sin aire o gases por una mala planificación. Para ello la mejor opción pasa por el uso de recicladores de aire de circuito cerrado<sup>108</sup>(CCR), por su larga autonomía, con el apoyo de al menos una botella auxiliar o *stage* a más de 200 bares siendo recomendable a 300 bares. Dentro de los CCR se recomienda el uso de recicladores laterales o frontales puesto que esto nos permitirá tenerlos controlados en todo momento y así evitar que éstos puedan colisionar o rozar con elementos rocosos que puedan dañarlos. También al atravesar restricciones o pasos estrechos en las galerías sumergidas podremos comprobar que el equipo no sufra ningún tipo de deterioro que pueda provocar el abortamiento de la inmersión o la pérdida de gas (Fig. 158.1).

#### 8.4.1.4.2. Escúter

Uno de los dispositivos más utilizados por los buceadores de cuevas es el escúter. A nuestro modo de entender este aparato es útil para las aproximaciones hasta la zona o área de trabajo por el ahorro de gas y esfuerzo de aleteo, pero no así cuando se pretende hacer una prospección visual detallada puesto que la velocidad de escúter, por mínima que ésta sea, difiere de la metodología utilizada en la prospección, donde la visión de detalle en busca de restos debe hacerse pausadamente y de un modo continuo. Otra cosa es hablar del escúter como herramienta puramente de trabajo como es el caso del escúter de aluminio de SEACRAFT utilizado junto al sistema de navegación ENC2 donde este dispositivo se vuelve imprescindible en la lectura de los diferentes parámetros topográficos (Fig. 158.1).

---

<sup>108</sup> La palabra rebreather significa reciclador y es un sistema mediante el cual reciclamos los gases que exhalamos para volver a introducirlos en el circuito de respiración. Los rebreather o CCR son circuitos de respiración cerrada, es decir, no emiten burbujas al exterior. Fuente; <https://www.buceoespana.com/rebreather/>.

#### 8.4.1.4.3. Dispositivos de mapeo por hilo. El MNEMO

Una de las grandes revoluciones en el mundo de la exploración y topografía subacuática en cavidades ha sido el mapeo por hilo y la llegada del dispositivo comercial MNEMO (Kister, 2017). La precisión de los parámetros obtenidos y la posibilidad de cargar y descargar los datos en software en línea ARIANE no solo lo hace atractivo para cualquier proyecto de exploración y topografía sino también para la arqueología subacuática. Las recomendaciones en este aspecto pasan por el uso continuado del dispositivo y la repetición de las líneas de mapeo tanto para la cotejación de resultados como para la adquisición de las habilidades necesarias para conseguir lecturas rápidas y correctas. En nuestro caso fue el dispositivo más utilizado y el que mejor rendimiento y fiabilidad dio en los resultados obtenidos (Fig. 64.1).

#### 8.4.1.4.4. Los dispositivos de radiolocalización

El uso de la radiolocalización en la prospección subacuática en cavidades sumergidas pasa solamente por el conocimiento adicional de la ubicación de un sitio concreto respecto a la superficie terrestre. Esto puede ser bidireccional, puesto que permite desde socorrer desde el exterior a un espeleo-buceador, atrapado en una burbuja de aire en el interior, hasta conocer qué tipo de casuística ha existido en el exterior terrestre para que existan remanentes arqueológicos en el interior de las galerías sumergidas.

En nuestro caso, los dispositivos de radiolocalización utilizados, PINGER y SUMMER, han ayudado a la investigación histórica y metodológica ya que gracias a ellos conseguimos el geoposicionamiento concreto de las bocas secundarias colapsadas, que daban acceso en la antigüedad al interior de la cavidad. La recomendación en el uso de la radiolocalización pasa por conseguir la verticalidad en la emisión de la señal hacia la superficie, lo cual solo se consiguió con el dispositivo PINGER por tener una flotabilidad positiva mientras que el resto de los dispositivos utilizados no consiguieron esa funcionalidad buscada. Esto solo permite tener una opinión autocrítica hacia la metodología usada en su

colocación, pero no hacia el dispositivo en sí, puesto que estudios previos aconsejan su uso siempre y cuando la técnica sea la adecuada en su transporte, colocación y puesta a punto en interior del sitio indicado (Figs. 73.3 y 73.4).

#### 8.4.1.4.5. Los navegadores subacuáticos. El ENC2 de SEACRAFT

El dispositivo ENC2 de la marca SEACRAFT ha sido sin duda un revulsivo dentro de los dispositivos electrónicos utilizados en las diferentes campañas de intervención. Las lecturas o tracks obtenidos por este aparato son realmente rápidas y de bastante precisión, siempre y cuando nuestra tolerancia topográfica o nuestro margen de error dispuesto a asumir sea relativamente alto, ya que otros dispositivos como el MNEMO consideran que un margen de error superior del 2% no es asumible. Pero por otra parte el ENC2 presenta una serie de carencias difíciles de paliar como; I) el porcentaje de error o de falta de precisión en el valor obtenido por el ENC2 es difícil de calcular respecto al valor real, puesto que es casi imposible trazar la misma lectura de ida como de vuelta, siendo necesaria la coincidencia entre ambas para poder calcular el porcentaje estimado de error, II) la dificultad en el uso del ENC2 pasa por tener un técnico o un espeleo-buceador experimentado que consiga una correcta calibración del dispositivo y un buen manejo continuo del escúter sobre el que va montado, III) para usar correctamente este dispositivo es necesario que haya visibilidad, lo cual no siempre es posible debido a la haloclina y a la rápida aparición del sedimento en suspensión, lo que hace inviable su uso por riesgo de colisión con cualquier parte rocosa de la cueva y IV) la falta de una medición correcta del ENC2 al paso por las restricciones o pasos angostos ubicados en el interior de las galerías sumergidas provoca que el aparato pierda la calibración y la lectura continua necesaria para evitar errores. Esto en ocasiones es imposible evitarlo por la propia morfología de la cueva (véase capítulo 7.4.3.1.3.).

Nuestra valoración es agridulce en este aspecto puesto que sin duda es un dispositivo que tiene un gran potencial, pero no es válido para todo tipo de morfología de cueva, al menos aquellas con poca o nula visibilidad y con restricciones a su paso. La gran ventaja es que es posible, en algunos modelos,

introducir la coordenada de destino lo cual garantiza que cualquier resto arqueológico encontrado, con sus correspondientes coordenadas correctas, podrá ser localizado por otro buzo ajeno sin problemas, de una forma rápida, eficiente y evitando largas inmersiones en busca de nuevo de la ubicación exacta del remanente arqueológico. Actualmente, ya ha aparecido una nueva generación de GPS subacuático con la llegada del ENC3, que mejora y corrige todas estas imperfecciones de su anterior modelo ENC2.

#### *8.4.1.4.6. Los sistemas topográficos y los GPS profesionales*

Desde hace años son centenares los proyectos topográficos en cuevas terrestres y sumergidas que han intentado generar datos correctos a través de múltiples softwares como Survex, WinTopo, Topo Win o ARIANE centrandos sus esfuerzos en conseguir un mejor mapeo y una precisión máxima en sus trabajos. Evidentemente, la falta de una señal GPS que corrobore la ubicación exacta de las diferentes estaciones de mapeo en el interior de las cavidades disminuye esa precisión topográfica que, poco a poco, va siendo más compleja de obtener cuando nos adentramos en su interior, generando así datos con lo que denominaríamos una tolerancia topográfica amplia. Pero ¿qué ocurre si necesitamos conseguir una precisión exacta de un punto lejano a una señal GPS? Este ha sido uno de los objetivos más complejos de conseguir y uno de los retos más importantes de la presente tesis y de los proyectos prospectivos presentados.

Sabemos que la precisión obtenida en cualquier tipo de medición manual siempre será menor al valor real y que la precisión en la obtención de una coordenada concreta siempre será igual al valor real menos el error observado. Por esta razón el único valor más cercano al real ha sido obtenido por el MNEMO al generar puntos de control en el interior de las cavidades estudiadas que nos ha permitido realizar mediciones secundarias aproximadas. Por ello, no podíamos partir de una coordenada aproximada sino de una coordenada con un valor real y eso solo se podía conseguir mediante el uso de un GPS diferencial profesional (Fumás, 2022b) (Fig. 158.2).

Nuestra recomendación en este aspecto es completamente favorable tanto a la utilización de un sistema de GPS profesional como al uso de la estación total o a la incorporación de un distanciómetro y un microprocesador en un teodolito electrónico, lo cual minimizará los errores obtenidos en las mediciones. En nuestra experiencia, ésto optimizó esa precisión topográfica buscada en; I) la obtención de las coordenadas de inicio del hilo guía en la parte sumergida de la cova Genovesa, II) la obtención de las coordenadas de inicio en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou, III) en la generación de un punto 0 en las mediciones radiales de la cova de la Font de Ses Aiguades como, finalmente, IV) en la obtención de las coordenadas correctas en la recepción del emisor de radiolocalización PINGER, SUMMER y MICROSUMMER en la Sala de los Moros y la Galería de las Cónicas en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou.

#### 8.4.1.4.7. El AUV

La utilización de vehículos autónomos subacuáticos (AUV) o los vehículos operados remotamente (ROV) son una herramienta importante siempre y cuando este definida su función en el proyecto. En nuestro caso el uso del AUV del CIRS<sup>109</sup> en la cova de la Falconera fue de gran utilidad, pero no determinante, ya que la sonda multihaz generó una nube de puntos 3D que ayudó de una forma importante al conocimiento de la Galería Jaume Ferran y la búsqueda de las posibles zonas fértiles arqueológicas (Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a). De todos modos, estos dispositivos no sustituyen a la prospección visual tradicional, aún con mínima visibilidad, ya que se hace necesaria la intervención humana en la búsqueda y documentación gráfica de los restos arqueológicos. Por otro lado, debemos decir que los avances científicos en esta materia, sobre todo a nivel de documentación, están avanzando muy rápidamente con la aparición de ROV inalámbricos que permiten una visualización en directo de las zonas sumergidas de interés de la cueva. Estos dispositivos sumergibles como el Boxfish<sup>110</sup>

---

<sup>109</sup> <https://cirs.udg.edu/>

<sup>110</sup> <https://www.boxfish.nz/>

consiguen grabaciones cinematográficas en 4K incluso en condiciones muy adversas e incluso fotogrametrías sin intervención humana directa<sup>111</sup>.

Nuestra recomendación es valorar objetivamente la necesidad de un AUV en la prospección ya que el gran problema en el uso de estos dispositivos es su alto coste económico, tanto en el alquiler como en la compra. Además, es necesario contar con un equipo humano formado en el uso y conducción del ROV en cavidades cársticas confinadas, lo cual todavía encarece más el proyecto y penaliza de forma importante su viabilidad.

#### 8.4.1.4.8. Las cámaras fotográficas

Uno de los pilares más importantes en la prospección arqueológica es la documentación fotográfica. Por su sencillez y brevedad en la actuación permite generar una imagen completa del yacimiento y de cada una de las piezas arqueológicas de interés (León, 2003; Woelfl, 2017). De igual modo, la captura de imágenes permite la generación de modelos fotogramétricos 3D, esenciales para la medición, documentación y contextualización del yacimiento. Por eso, nuestra recomendación, es la utilización de cámaras que posibiliten la toma fotográfica de alta resolución con firmware personalizado que permita la toma de fotos a intervalos consistentes y una velocidad de obturación, apertura y distancia focal establecidas. Además, es importante tener una buena iluminación, tanto anexa a la propia carcasa de la cámara como con focos auxiliares manejados por espeleobuceadores de refuerzo. Una de las técnicas más recomendable, en nuestra experiencia de trabajo, ha sido el uso del flas electrónico adicional, denominado esclavo, que se ilumina solo cuando se presiona el obturador de cámara, disimulando las sombras y generando una iluminación completa del área de intervención (*véase capítulo 7.4.5.2.2.*).

---

<sup>111</sup> [https://www.youtube.com/watch?v=\\_jEA9ekJ5A8](https://www.youtube.com/watch?v=_jEA9ekJ5A8)

#### 8.4.1.5. *Los recursos humanos*

Una de las lecciones aprendidas más importantes en las diferentes campañas prospectivas fue sin duda la importancia de tener un equipo humano profesional, titulado por certificadoras internacionales en buceo en cuevas (TDI, GUE, ACUC, etc.), y disciplinado, el cual deberá estar en todo momento al servicio de los objetivos marcados en el proyecto. Es completamente innecesario el aporte de recursos humanos sin conocimiento o experiencia previa en una disciplina tan específica como la prospección subacuática en cavidades.

La pérdida de tiempo y recursos económicos no solo es un factor negativo, sino que agrava de forma contundente la complementariedad del resto de las técnicas usadas. Por ejemplo, la mala praxis en la utilización del MNEMO en la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camps des Pou o el error metodológico en la captura de fotografías en la cova de la Font de Ses Aiguades durante la campaña del año 2019 obligó a la repetición de todas las inmersiones durante días, lo cual generó una mala documentación y, finalmente, obligó a repetir las mismas pruebas en una nueva campaña de prospección. Esto que en superficie podría considerarse algo leve, para una campaña arqueológica subacuática exigente en cavidades sumergidas es realmente grave.

Nuestra recomendación pasa por el uso de recursos humanos específicos experimentados en las pruebas técnicas a realizar. Solo de este modo se puede garantizar el éxito de una campaña arqueológica tan concreta y determinada como es una cavidad cárstica confinada.

#### 8.4.1.6. *Los recursos logísticos*

El mundo de la espeleología en general es demandante de importantes recursos logísticos debido a las largas aproximaciones que se deben efectuar desde el lugar de acceso hasta el lugar de destino. En exploraciones de cavidades terrestres, e

incluso subacuáticas en cámaras de aire, es habitual la pernoctación en vivac<sup>112</sup> en el interior de la misma como medio para ganar tiempo y economizar recursos (Gómez, 2006).

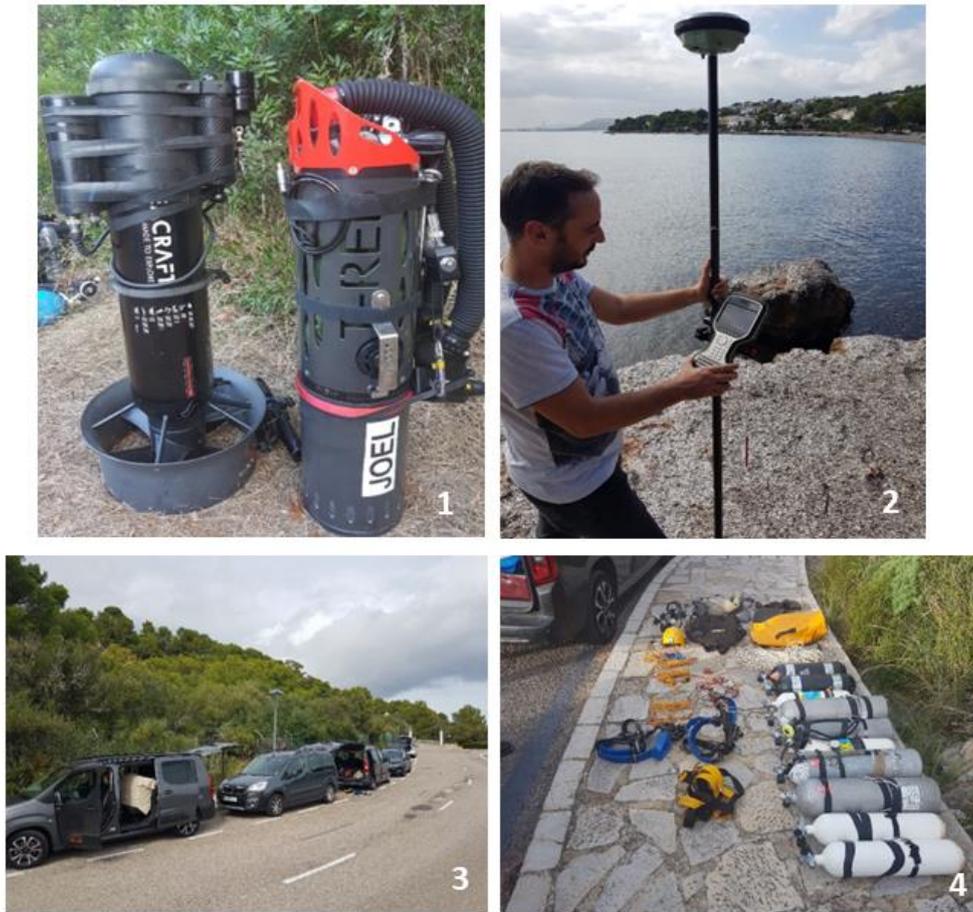
En nuestro caso, muchos de los recursos técnicos utilizados fueron obtenidos internacionalmente, con el sobre coste económico que esto conlleva, y otros fueron desplazados en barco o avión desde la península ibérica hasta las islas.

Nuestra recomendación en este aspecto es trabajar, siempre que sea posible con recursos propios ubicados en el lugar de origen, aunque en principio pueda suponer un sobre coste en el presupuesto financiero del proyecto, ya que logísticamente esto facilitará la rapidez y eficiencia del proyecto y reducirá estrés y esfuerzo físico al equipo humano (Figs. 158.3 y 158.4).

En ocasiones, una buena logística va precedida de una mejor planificación, siendo estos elementos indivisibles en la practicidad buscada para minimizar recursos. La necesidad de redundancia de material y botellas de buceo en la práctica prospectiva hace necesario una capacidad de carga y desplazamiento de material que solo puede ser solventada mediante el transporte en furgonetas y vehículos pesados. Por eso, trabajar con un equipo humano autóctono del área de intervención evita desplazamientos innecesarios, reduce costes de alquiler de maquinaria y vehículos y garantiza indirectamente la integración de la gente en la participación del propio proyecto (Fig. 158.4).

---

<sup>112</sup> Hacer un vivac significa dormir al raso con un saco de dormir. Esta actividad está permitida en todo el territorio español, a cualquier altitud, y no se necesita ningún tipo de permiso.



**Figura 158.** Imágenes del material técnico utilizado en la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM; **1.** Imagen donde aparece un escúter de aluminio de la marca SEACRAFT y un CCR o reciclador de aire lateral de la marca T-REB. (Foto; Autor). **2.** Imagen del topógrafo Pablo Cantuel tomando la coordenada con un GPS diferencial en la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM. (Foto; Autor). **3.** Furgonetas cargadas del material necesario para poder llevar los trabajos de prospección en la cova de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia) en la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM. (Foto; Autor). **4.** Material de buceo y rápel necesario para la entrada y prospección de la cavidad de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia) tan solo para el equipo de una inmersión de las múltiples necesarias en un solo día. Campaña del año 2020 del Proyecto IASCM. (Foto; Autor).

#### 8.4.1.7. Organización de la inmersión y el plan de seguridad

Nuestra recomendación, antes de realizar cualquier intervención en una cueva sumergida es que debemos tener preestablecidas unas pautas globales marcadas por el plan de seguridad de la normativa vigente. Una de las partes más importantes del proyecto, es la organización de las inmersiones en el interior de la

cavidad sumergida. En primer lugar, debemos tener presente lo que marca la normativa legal reguladora en cada una de las comunidades autónomas. Por ejemplo, en el caso de Mallorca, no es posible introducir más de seis espeleobuceadores en la cavidad al mismo tiempo por motivos de seguridad y control de la inmersión. Por esta razón, es importante llevar un control exhaustivo de los miembros del equipo que se introducen en la cavidad, anotando la finalidad de su inmersión, la hora de entrada y la hora de salida, quedando reflejado todo en una ficha de control que deberá ser actualizada en todo momento.

Al igual que ocurre en las inmersiones en mar abierto, es muy importante el momento del *briefing* o sesión informativa donde se presenta la información importante que deben conocer los miembros del equipo de intervención. Esta es; I) indicar las condiciones medioambientales de la cueva, el estado de las galerías y de la línea guía, II) indicar el objetivo concreto de la inmersión y las expectativas esperadas, III) conocer la cantidad de gas necesario para realizar el trabajo programado, IV) recalcar la importancia de la seguridad, ya sea del buceo por parejas o en equipo, y V) recordar los procedimientos de emergencia en caso de accidente o cualquier problema imprevisto.

El aprovechamiento de cada una de las inmersiones será directamente proporcional al entendimiento claro de la función que tiene cada uno de los miembros del equipo durante su permanencia en el interior de la cavidad. Evitar duplicidades en el trabajo, optimizar el aire de las botellas y tener un objetivo concreto y claro permitirá la organización y el éxito de la inmersión y por ende del propio proyecto.

Actualmente la norma aplicable a nivel estatal es el Real Decreto 550/2020, de 2 de junio, por el que se determinan las condiciones de seguridad de las actividades de buceo, pero debemos ser conscientes de que también es necesario seguir la normativa autonómica. Por ejemplo, en el caso del Proyecto IASCM, realizado en Mallorca, se tomó como norma aplicable el Decreto 40/2007, de 13 de abril, por el que se regula el buceo deportivo y recreativo en la Comunidad Autónoma de las Illes Balears y en su Artículo 10 “Seguridad en los lugares de inmersión”, nos hizo constar la obligatoriedad de que en todos los lugares donde se lleven a cabo actividades de buceo debe asegurarse la disponibilidad de lo siguientes medios: I) un botiquín de primeros auxilios adecuado para las actividades de buceo

planificadas, II) una unidad de emergencia de oxígeno con una capacidad de suministro de al menos 15 litros/minuto de oxígeno puro para, como mínimo, 20 minutos, III) un sistema de comunicación adecuado para alertar a los servicios de emergencia y IV) un plan de emergencias y evacuación, que tiene que contener los requisitos establecidos en el artículo 13.2.h de este Decreto.

De este modo, se debe plantear la redacción del plan de emergencia, el cual será de aplicación inmediata en el momento que ocurra cualquier circunstancia de las que quedan reflejadas en el mismo, siguiendo de este modo todos los protocolos que marca el decreto anterior. Por esta razón, es importante contar en todas las inmersiones con personal cualificado y homologado en protocolos de prevención y evacuación en caso de emergencia, y disponer de un botiquín de primeros auxilios, equipo de Reanimación Cardio Pulmonar (RCP) y administrador de O<sub>2</sub>. El equipo necesario será; I) un sistema de comunicación teléfono móvil o radio, II) un botiquín de primeros auxilios adecuado para buceo (manuales), III) una unidad de O<sub>2</sub> con capacidad de suministro de al menos 15 l/m de O<sub>2</sub> al 100% con una duración mínima de 20 minutos, IV) un informe de accidente/incidente, V) una tabla de actuación en caso de accidente de buceo, VI) un procedimiento de búsqueda de uno o más buceadores, donde se debe establecer el número de buceadores accidentados-extraviados y la última zona-punto de localización con la mayor exactitud posible mediante la última topografía del lugar y VII) una lista de contactos que utilizar en una evacuación de emergencia.

Además, si el accidente ocurre en una cavidad sumergida se procederá a activar el protocolo de emergencias y se contactará con espeleo-buceadores que quieran y puedan participar en la búsqueda, valorando su experiencia y conocimientos del lugar bajo el consentimiento de la Guardia Civil (GEAS) y otros cuerpos de seguridad del estado.

Además, se recopilarán todo tipo de datos sobre las principales características de la cavidad; I) tipo de cavidad horizontal, pozo, mixta, etc., II) la topografía actualizada en caso de que esté en fase de exploración, tipos de materiales que predominan en la cavidad, dimensiones de las salas y galerías, recorrido, profundidad, temperatura, visibilidad, corrientes, etc. y III) los lugares a destacar como; pasos angostos, nivel de visibilidad, desprendimientos, cámaras con aire

respirable y otras con alto valor de CO<sub>2</sub>, ramificaciones, tipo de instalación y señalizaciones utilizadas.

El siguiente paso consistirá ya en organizar la búsqueda según los parámetros anteriores; I) se necesitará un número no mayor de dos buceadores experimentados que empezarán las labores de búsqueda, en casos excepcionales podrá ir un buceador bajo aprobación de los cuerpos de seguridad, II) las labores de búsqueda se ceñirán a un plan preestablecido y no se excederán los límites en cuanto a consumo y profundidad, III) se deberá señalar la ruta a seguir con marcas especiales y se eliminarán las ramificaciones y las líneas secundarias que puedan dar lugar a confusiones y IV) en el caso que las condiciones de visibilidad sean malas se abortará la búsqueda y se dará tiempo para su mejoría.

Por último, tras la localización del accidentado, se deberán seguir los siguientes pasos; I) se deberá activar el PAS (Proteger, Alertar y Socorrer), valorar el estado del accidentado (consciente/inconsciente), comprobar si respira y si es así ponerlo en Posición Lateral de Seguridad (PLS) y en caso contrario deberemos comenzar la Reanimación Cardio Pulmonar (RCP) para finalmente dar aviso al personal en superficie y replantear una nueva inmersión para el rescate, II) en el caso de encontrar el buzo sano y salvo el equipo de rescate le suministrará tanques extra de aire para el regreso, se le dará de beber o comer si los médicos lo aconsejan y autorizan, siendo también aconsejable que durante el regreso el buceador con más dificultades vaya delante de los rescatadores y III) en el caso de que el accidentado no respire el equipo de rescate deberá llevar más suministro de aire para ellos mismos, debido al esfuerzo al movilizar el cuerpo inerte.

Muchos espeleo-buceadores experimentados han muerto en cuevas en todo tipo de accidentes, ya sea porque se pierden, abandonan, pierden la línea guía, bucean demasiado profundo sufriendo una narcosis por nitrógeno<sup>113</sup> o suben muy rápido a

---

<sup>113</sup> La narcosis en buceo consiste en que la conciencia del buceador con botella de gas con nitrógeno se ve alterada por la alta solubilidad de este gas con el agua. El efecto producido es parecido a una borrachera.

superficie padeciendo el síndrome de sobre expansión pulmonar<sup>114</sup> (Buzzacott *et al.*, 2009; Potts, Buzzacott y Denoble, 2016; Sümen y Aktas, 2019).

Tan solo a través de la obtención de unos requisitos básicos como un entrenamiento permanente y una óptima aptitud física y mental se pueden conseguir las habilidades necesarias para este tipo de intervenciones científicas (Iliffe y Bowen, 2001). Además, debemos ser conscientes de la importancia del buceo en equipo, ya que si no es imposible salir airoso de situaciones complejas o peligrosas en el interior de un espacio confinado sumergido y sin visibilidad (Devos, Le Maillot y Riordan, 2005).

## **8.4.2. Fase 2. Seguridad y documentación**

### *8.4.2.1. La prospección visual*

La prospección visual arqueológica tiene como finalidad obtener la máxima información, tanto de las condiciones de seguridad de la cueva como de la ubicación y documentación de los restos arqueológicos en las distintas zonas de las cavidades. En nuestro caso, la prospección arqueológica más utilizada fue la primaria y la pendular, utilizando las mediciones de eje cartesiano y triangulación para geoposicionar las diferentes piezas arqueológicas y paleontológicas de interés.

Nuestra recomendación al respecto es que para realizar una prospección segura se deben cumplir unos requisitos previos básicos, siendo el primero de todos garantizar la seguridad de la inmersión, sobre todo a través de la comprobación del buen estado de la línea guía o línea de vida.

Por último, en el caso de carecer de una topografía previa de la cavidad y no disponer de un hilo guía, será necesario la colocación de la línea y el dominio de la medición de las poligonales y radiales. Para ello se deberá tomar como referencia siempre un punto concreto reconocible de la línea guía, ya que nos

---

<sup>114</sup> El síndrome de sobreexpansión pulmonar (SSP) se produce al expandirse el contenido gaseoso en el árbol pulmonar.

servirá como punto de referencia para obtener los siguientes puntos de control. La profundidad, la longitud y el acimut (ángulo de la brújula) formaran parte de esa medición poligonal. De este modo, durante nuestras mediciones conseguiríamos alinear un número concreto de polígonos, que posteriormente transferiríamos a un plano, utilizando un sistema de información geográfica SIG (ArcGis, QGis y ArcScene), el cual nos permitirá crear mapas tridimensionales georreferenciados (Huber, 2009, 2014; Al Hamdani *et al.*, 2012; Gregory y Manders, 2015).

#### 8.4.2.2. Inspección del estado de la cavidad y del hilo guía

La inspección de la cavidad es un elemento fundamental antes de realizar cualquier intervención arqueológica prospectiva. Las condiciones medioambientales y morfológicas de la cavidad como; el derrumbe de pasos estrechos, la contaminación de las aguas, el aumento del sedimento en suspensión o el aumento de la haloclina o termoclina entre otros, más el cambio o modificación de las líneas o de las señales, concretamente de la línea guía, por rotura, desgaste o desplazamiento voluntario o involuntario puede provocar un peligro importante que debe ser paliado y controlado (Buzzacott *et al.*, 2009).

En nuestro caso, ciertas cuevas como la cova del Sistema Sa Gleda- Camps des Pou o la cova Genovesa sufrieron cambios constantes en sus líneas guía, por falta de entendimiento o rivalidad entre los distintos equipos de exploración que actúan en el interior de estas cavidades, lo cual provoca confusiones y malentendidos que se agravan cuando las condiciones del agua son adversas.

Nuestra recomendación es realizar siempre una inmersión previa, sobre todo por un espeleo-buceador que conozcan bien la cavidad, ya que resulta una tarea imprescindible para garantizar la seguridad del resto del equipo de intervención. Debemos comentar la necesidad de que este primer buzo intente levantar el mínimo sedimento posible durante su inspección de la cavidad, ya que de lo contrario tareas como la documentación gráfica o la filmación posteriores quedaran mermadas o directamente inutilizadas.

#### 8.4.2.3. La filmación en video

Dentro de las herramientas de documentación utilizadas en la arqueología subacuática, las imágenes tomadas a través de la videografía siempre han sido muy relevantes, ya que aportan una gran cantidad de información que puede ser visualizada posteriormente por el equipo en el trabajo de gabinete (León, 2003). Además, incluso en las prospecciones arqueológicas subacuáticas más avanzadas, con dispositivos ROV o AUV, la grabación simultánea con vídeo, aporta datos complementarios, tanto dinámicos como estáticos del interior de la cueva y del propio yacimiento (Conte *et al.*, 2008; Bowens, 2009; Huber, 2014; Weidner *et al.*, 2016).

En el caso de la aplicación de la filmación videográfica en los diferentes proyectos de investigación de la presente tesis, la grabación en vídeo ha servido para cumplir dos objetivos fundamentales. El primero de ellos, fue la documentación visual de las partes arqueológicas, arquitectónicas y paleontológicas de los restos sumergidos en las cuevas para su posterior visualización, generando una base de datos completa y posibilitando la difusión de las imágenes a profesionales expertos en la materia para valoración y estudio. El segundo fue la obtención de fotografías concretas, extraídas de la grabación del video realizado alrededor, del perímetro del yacimiento arqueológico en la cova de la Font de Ses Aiguades. Gracias a programas como *Video to image Converter* se pudieron completar los vacíos o *gaps* obtenidos en el modelo fotogramétrico 3D (Fumás *et al.*, 2022).

Nuestra recomendación es la filmación en video en 4K, siempre que sea posible, ya que permite la obtención rápida de la documentación videográfica del objeto a estudio (Bowens, 2009; Huber, 2014). Las características intrínsecas de las cavidades sumergidas como la percolación o el sedimento en suspensión provocado por los movimientos y respiración del propio buceador imposibilitan en ocasiones la toma de fotografías nítidas. Es por esto por lo que, la filmación en video es la mejor opción. Por ejemplo, este fue el caso de la documentación videográfica de los restos paleontológicos de *Myotragus balearicus* en la pequeña sala de la galería del mismo nombre en la cova Genovesa o d'en Bessó (Gràcia

*et al.*, 2003). Gracias a la grabación en vídeo se pudieron extraer unas pocas imágenes nítidas de la fauna conservada, pudiendo medir y orientar los restos óseos gracias a la escala centimetrada colocada junto a ellos (Fig. 104).

#### 8.4.2.4. La toma de fotografías y la fotogrametría

Según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) la fotogrametría es la ciencia y tecnología utilizada para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de la grabación, medición e interpretación de imágenes. Más recientemente, se ha definido como la creación de modelos digitales en 3D a partir de fotografías en 2D (Yamafune, 2016; Mayoral, 2017; Moya y Muñoz, 2017). Y, aunque en tiempos recientes la fotografía subacuática georreferenciada ha tomado fuerza como herramienta de documentación visual y espacial, esta solo puede ser utilizada allí donde es viable encontrar una señal GPS, mediante el empleo de una boya que flote en superficie (Woelfl, 2017).

La realidad es que hay una serie de pasos concretos en el proceso de creación de modelos 3D, y todo este proceso se basa en el flujo de trabajo necesario para crear modelos utilizando el software Agisoft Metashape Professional . El primero de estos pasos es alinear las imágenes. Agisoft Metashape Professional hace esto escaneando cada imagen en busca de puntos de alto contraste, llamados “puntos clave”. Posteriormente, estos puntos de alto contraste se comparan entre cada imagen y se filtran para detectar posibles coincidencias. Una vez que estos puntos se han emparejado entre dos o más imágenes, se denominan “puntos de enlace”. Al rastrear las ubicaciones relativas de los puntos de enlace dentro y entre las imágenes, se puede calcular el movimiento relativo de la cámara (Martínez-Espejo, 2014; Quirós, 2014; Aguilar, Granado y Barrera, 2015; Gijón-Yescas *et al.*, 2021).

En nuestro caso, para obtener buenos puntos de enlace, recomendamos que todas las fotos realizadas tengan el mismo tipo de iluminación, con un enfoque nítido y con buen contraste. Las imágenes desenfocadas o borrosas, debido al movimiento del buzo, generan datos incorrectos y hacen que los modelos pierdan precisión o

no se procesen correctamente. Por lo tanto, es imperativo conseguir fotos con la máxima nitidez. También es necesario obtener una buena superposición entre las imágenes correlativas y cualquier otra en las inmediaciones. Esta técnica, realizada encima del agua, puede ser suficiente con un porcentaje de solapamiento del 50-60%, pero para obtener buenos resultados bajo el agua, se necesita alrededor del 80%.

Y, aunque pueda parecer que la grabación en video es la mejor manera de capturar imágenes, a menos que se utilice un equipo de cámara muy costoso, que tenga la capacidad de grabar en video RAW 8K, los archivos de imagen siempre tendrán una resolución baja y deberán estar comprimidos. Esta compresión, aunque a simple vista no es perceptible, reducirá los puntos de contraste necesarios para generar modelos óptimos 3D, y el desenfoque de movimiento en los fotogramas provocará problemas con el procesamiento. Muchas cámaras de nivel usuario utilizan un obturador rodante, lo que significa que cada píxel del sensor se activa secuencialmente en lugar de simultáneamente, lo que conlleva un sesgo en las imágenes que deben corregirse, ya que escanea la escena progresivamente ya sea horizontal o verticalmente, a medida que va tomando la imagen, lo cual provoca una distorsión notoria.

Por ejemplo, en nuestro caso, en la cova de la Font de Ses Aiguades, al realizar la fotogrametría en el agua se trató de reducir la distorsión de la lente tanto como fuera posible, por lo que se usaron lentes con una distancia focal de 45 milímetros o más, lo cual optimizó la calidad de las fotografías, obteniendo imágenes nítidas y sin distorsiones. Sin embargo, bajo el agua hay que tener en cuenta la física de la dispersión de la luz (Hwang *et al.*, 2016).

En nuestra experiencia, la luz de los focos que atravesaba el agua se atenuaba en función de la distancia, por lo que reducir la distancia entre la lente y el objeto, y las fuentes de luz y el objeto era fundamental para obtener buenas imágenes. Si usábamos una lente de 45 milímetros bajo el agua a corta distancia (1 metro), no era necesario una gran cantidad de fotografías para obtener un modelo inmanejable. Por lo tanto, experimentalmente, una lente que tenga una distancia focal de 16 milímetros (fotograma completo) nos ha demostrado ser una técnica óptima. A 16 milímetros en las imágenes había una gran cantidad de distorsión de ojo de pez, sin embargo, esto era constante y, por lo tanto, podía ser manejado por

el programa Agisoft Metashape Professional, permitiendo al buzo acercarse mucho al objeto y aun así obtener una buena superposición.

Con la lente de 16 milímetros, fue importante tener una buena profundidad de campo para mantener todo bien enfocado, por lo tanto, se usó una apertura de alrededor de F8<sup>115</sup>. Las aperturas más pequeñas obtendrían una mayor profundidad de campo, pero a expensas de requerir más luz para exponer correctamente la imagen, ya que una apertura más grande requeriría menos luz, pero no tendría todo el encuadre enfocado.

Debido a que en nuestro caso la cámara era necesariamente de mano (no era práctico montar la cámara en un trípode para la fotografía subacuática, especialmente en un entorno de cueva limosa) se utilizó una velocidad de obturación de 1/100 segundos. Esto provocó un compromiso entre una toma más rápida, con menos desenfoque de movimiento, y una toma más lenta que permitiera una exposición de luz superior en la imagen. Ambas variables deben controlarse y bloquearse manualmente.

La última variable por considerar era el ISO o ganancia de la cámara. En términos generales, la podíamos ajustar fácilmente, aunque con nuestra experiencia sabíamos que era mejor comenzar en ISO 1600 y ajustar desde allí si fuera necesario. Debemos ser consciente que los ISO más altos permiten buenas exposiciones con menos luz, sin embargo, también introducen ruido de ganancia digital (o grano, como se lo conoce a veces), que se manifiesta como un patrón de bajo contraste de luz y oscuridad sobre la imagen (Igual, 2019). Estos bordes de grano pueden confundir al software, haciéndole creer que está en el sujeto subyacente y, por lo tanto, dificultar la alineación y la precisión.

Todas estas limitaciones y variables son parte del proceso de toma de decisiones en lo que respecta a la elección del equipo fotográfico a utilizar. En realidad, hay otras dos variables que también deben tenerse en cuenta; el coste económico y la profundidad de uso.

Por último, como ya hemos comentado anteriormente, para procesar las imágenes en modelos fotogramétricos 3D, se utilizó Agisoft Metashape Professional. Este

---

<sup>115</sup> La apertura del diafragma en 8 es el punto dulce de muchos lentes, donde podemos encontrar buena nitidez y disminución de la profundidad de campo al no dejar que entre tanta luz en la cámara.

software ha demostrado su fiabilidad para crear modelos 3D a partir de imágenes subacuáticas. Desafortunadamente, debido a las limitaciones de la fotografía subacuática, las imágenes nunca son perfectas, siempre hay algún tipo de distorsión o reducción en la calidad debido al agua, y esto es peor en aguas turbias que se encuentran en cuevas, provocado por el sedimento en suspensión. Algunos softwares como Pix4D o Reality Capture, cuando se probaron, no generaron modelos de gran resolución, aunque fueron rápidos de procesar. En cambio, Agisoft Metashape Professional tiene un tiempo de proceso más lento, pero crea modelos más reales y con una resolución óptima.

Además, Agisoft Metashape Professional tiene una aplicación de visor, que permite a los investigadores ver y medir desde el propio modelo 3D. Desafortunadamente, para poder enviar el modelo a otros investigadores y arqueólogos se requiere compartir la carpeta completa del proyecto que, por ejemplo, en el caso del proyecto de cova de la Font de Ses Aiguades tenía alrededor de 160 gigabytes de datos.

Una recomendación al respecto es subir el modelo al conocido sitio web llamado Sketchfab<sup>116</sup> que permite compartir modelos 3D, aunque éste no permite medir ni compartir el modelo de alta resolución. Otra opción es enviar el modelo al sitio web denominado Construkted<sup>117</sup>, que permite enviar tanto modelos de alta resolución como realizar mediciones directas.

#### **8.4.3. Fase 3. Métodos para la documentación georreferenciada**

De todos los métodos utilizados en los diferentes proyectos expuestos en esta tesis, nuestro esfuerzo y empeño desde el comienzo ha sido la consecución de un protocolo de actuación arqueológico que ponga en valor la necesidad de ubicar realmente la posición espacial de un yacimiento en el interior de una cavidad sumergida. Nuestra recomendación es que a pesar de la dificultad técnica y la carencia de información al respecto se debe dar prioridad el conocer la geo

---

<sup>116</sup> <https://sketchfab.com/>

<sup>117</sup> <https://construkted.com/>

posición exacta de un objeto arqueológico respecto a la topografía de la cueva y a la superficie terrestre.

#### *8.4.3.1. La observación manual de la poligonal de ida y vuelta. Dispositivo MNEMO*

A nuestro criterio, los únicos resultados reales de las dimensiones de una cavidad sumergida tan solo se pueden conseguir con dispositivos como el lector de hilo MNEMO (Kister, 2017) o con dispositivos de lectura volumétrica como las sondas multihaz implementadas en ROV o AUV (Foley y Mindell, 2002; Martins *et al.*, 2018; Richmond *et al.*, 2020; Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a).

Pero, lo realmente importante en la utilización del MNEMO es la posibilidad que ofrece este dispositivo de realizar una lectura real y objetiva del hilo guía, tanto de ida como de vuelta, siempre y cuando no se modifique la línea bajo ningún concepto, es decir una lectura lineal desde la entrada a la cavidad hasta nuestro punto final de documentación y viceversa (Fumás, 2022b).

De este modo, nuestra recomendación es la creación de poligonales manuales internas de los diferentes tramos de interés en las galerías sumergidas de la cueva, cuando no dispongamos de una topografía actualizada, y la observación de ida y vuelta en la lectura del hilo guía. Esta es la metodología más fiable, real y económica siempre y cuando se utilice el dispositivo MNEMO con un porcentaje de variación entre las lecturas inferior al 2% sin que la línea guía sea modificada.

#### *8.4.3.2. El replanteo en superficie del punto final. Emisor y receptor radiolocalización*

El replanteo topográfico corresponde al conjunto de operaciones destinadas a señalar en el terreno la ubicación de un punto concreto, en nuestro caso subterráneo, utilizando la estación total y el GPS (Gómez, 2005).

Gracias a la experiencia obtenida en el trabajo de campo, debemos tener presente que el método de radiolocalización no siempre es viable en el replanteo de puntos en superficie. El paso de líneas electrificadas, tuberías metálicas o zonas urbanizables pueden modificar la señal, al igual que una colocación errónea en la verticalidad del emisor de radiolocalización puede generar datos equívocos que lleven a un replanteo en superficie alejado de la realidad.

De todos modos, nuestra recomendación es que debemos considerar la gran potencialidad de este método, el cual abarata costes, reduce tiempo de inmersión y consigue buenos resultados, siempre y cuando la técnica en su colocación sea la correcta y el terreno permita atravesar las ondas de radiofrecuencia entre el emisor sumergido y el receptor en superficie.

#### *8.4.3.3. La observación de la poligonal de ida y vuelta con navegador ENC2 de SEACRAFT*

La finalidad de emplear este método era la de obtener unos nuevos resultados, analizar su fiabilidad en campo, compararlos con los resultados obtenidos por el dispositivo de mapeo por hilo MNEMO y conseguir una reiteración de la poligonal observada. La experiencia adquirida nos permite afirmar que aun contando con un equipo técnico y humano avanzado las posibilidades de coincidencia entre ambas lecturas, ida y vuelta, son casi imposibles, debido a que las rutas seguidas por ambos aparatos divergen en ciertos puntos de las galerías de la cavidad.

Todo esto debemos contextualizarlo dentro la tolerancia topográfica exigida en cada proyecto. Es decir, en proyectos de exploración donde se pretenda conseguir una topografía rápida y sencilla de la cavidad, para conocer las áreas de interés de estudio, el ENC2 de SEACRAFT es un dispositivo acertado siempre y cuando éste no pase por zonas restringidas que provoquen variaciones sustanciales en el acimut, lo cual provocará irremediabilmente errores considerables de lectura.

Nuestra recomendación es que, si buscamos una tolerancia topográfica mínima, con el objetivo de conseguir una georreferenciación concreta debemos considerar

que el ENC2 de SEACRAFT todavía no puede conseguir una navegación tan lineal como para obtener los datos deseados.

De todos modos, debemos destacar las grandes posibilidades de este dispositivo, ya que, en su última versión, incluye una instrumentación que permite volver a recorrer una ruta preestablecida gracias al sistema de guiado que integra el sistema ENC3 e SEACRAFT, en otros términos, el sistema permite replantar puntos, lo que es de gran ayuda en la previsión de campañas futuras.

#### *8.4.3.4. La observación volumétrica con sonda multihaz sobre AUV desde un punto conocido*

Como hemos visto en este trabajo, la imposibilidad de utilizar ningún tipo de dispositivo GPS en el interior una cavidad sumergida hace que realmente sólo seamos capaces de conocer las coordenadas en la entrada a la cueva, por lo que si, además, pretendemos crear una cartografía muy aproximada deberemos partir de esa única coordenada.

El AUV equipado con un ecosonda multihaz, montada en una unidad de giro e inclinación en la parte posterior del dispositivo, permite la construcción de un mapa final, el cual se divide en diferentes submapas, obtenidos al componer la trayectoria de navegación a estima con las medidas del sonar. Estos submapas se registran juntos usando el algoritmo Iterative Closest Point (ICP) para corregir la deriva entre las regiones re-observadas, creando una nube de puntos (Vallicrosa *et al.*, 2020).

De este modo, el uso del sistema multihaz equipado con una Unidad de Medida Inercial (IMU), un sensor de presión y un Doppler Velocity Logger (DVL) garantiza la fiabilidad y el rigor de las medidas y datos registrados, pudiendo ser exportados a un SIG para contextualizar el estudio geológico y arqueológico propuesto.

En resumen, nuestra recomendación es que, la utilización de la observación volumétrica a través de dispositivos o vehículos autónomos o semiautónomos permite el conocimiento de las galerías de la cavidad, a través del estudio de la

nube de puntos, su orientación, longitud y profundidad, pero no su geoposición, ya que para ello es necesario introducir manualmente la coordenada inicial, al tratarse de un espacio confinado. Esto permitirá al software interpretar su ubicación espacial pudiendo introducir los datos en un sistema de información geográfica (SIG).

Sin duda, este sistema mejorado, mediante un protocolo de actuación más riguroso y exhaustivo, y buscando prolongaciones más largas, en la navegación interna de la cavidad sumergida, puede generar una gran cantidad de datos útiles para el conocimiento arqueológico de la cavidad a través del mapeo de su morfología interna. El inconveniente que debemos tener en cuenta es el alto coste económico de esta técnica prospectiva y la dificultad técnica de orientación del dispositivo en remoto, en el caso de falta o nula visibilidad, lo cual implica la intervención directa de espeleo-buceadores en el guiado para evitar colisiones con los espeleotemas o con las restricciones internas de la cavidad.

#### *8.4.3.5. La topografía subacuática de radiación y método de líneas*

En el registro topográfico subacuático las técnicas más usadas como el eje cartesiano, la triangulación (Izaguirre, 2010) o la trilateración (Martin-Bueno y Sáenz, 2017) deben ser usadas en planos horizontales, ayudándose de plomadas para conseguir mediciones manuales acertadas, pero cuando no disponemos de los datos de la geoposición de dos de esos puntos debemos utilizar otros métodos topográficos como la radiación topográfica, que permite determinar coordenadas (X, Y, Z) desde un punto fijo llamado polo de radiación.

Nuestra recomendación al respecto es que debemos considerar esta técnica manual como eficiente pero topográficamente aproximada. Es decir que, al igual que en las mediciones del hilo guía, tan solo se puede considerar una medición empírica cuando somos capaces de realizar una medición de hilo de ida y vuelta coincidente. Para ello, una vez más debemos recomendar el dispositivo de mapeo por hilo MNEMO ya que los datos de acimut, profundidad y distancia quedan plasmados en el ARIANE comprobando la existencia o no del error humano en la medición de líneas.

#### 8.4.3.6. *La topografía de superficie*

Durante el transcurso de los diferentes proyectos la topografía convencional en el trabajo de campo tuvo papel fundamental, ya que enlazó todos los métodos subacuáticos mencionados con la georreferenciación de puntos replanteados en la superficie terrestre mediante la observación directa de las coordenadas

En nuestro caso, para la obtención de las coordenadas georreferenciadas de los puntos de inicio de la poligonal sumergida, y debido a que esos puntos o bien estaban sumergidos o se encontraban dentro de la cavidad, haciendo imposible la conexión de los dispositivos GPS con los satélites, se utilizó una estación total topográfica que consiguió observar una red topográfica de vértices que partían de los puntos observados en superficie con tecnología GPS.

Nuestra recomendación es que la utilización de esta metodología topográfica da rigurosidad a las observaciones recogidas ya que, gracias a estos métodos de topografía convencional de superficie, las poligonales que discurrían por las cavidades tienen una mayor fidelidad, ya que los puntos de inicio y el final de éstas son observados con la suficiente precisión como para ser considerados puntos fijos en la posterior rutina de cálculo y obtener así una poligonal cerrada o comprobada. De este modo, los resultados se tensan y, si las precisiones están por debajo de la tolerancia esperada, se puede asegurar la viabilidad geométrica del conjunto de los métodos empleados.

#### 8.4.3.7. *La documentación georreferenciada del yacimiento y su contextualización espacial*

Los objetivos en la investigación arqueológica prospectiva de las cavidades sumergidas van más allá de una arqueología de asentamientos o de un estudio espacial del asentamiento, sino que es posible ampliar el conocimiento de los paisajes culturales en todas sus dimensiones: ambiental, social y humano. Debemos recordar que, la dimensión social y humana del paisaje también incluye diferentes esferas: los asentamientos y dinámicas de la población, las zonas

agrícolas, su estructuración y la conceptualización de los espacios como entornos simbólicos (Rodríguez Alcalde, 1995; Criado, 1999).

Nuestra recomendación es que, gracias al conocimiento de las coordenadas reales de un yacimiento sumergido, es interesante superponer éstas en un plano cartográfico, ya que facilitará la generación de hipótesis históricas que contextualizaran no solo el yacimiento arqueológico sino su área de influencia. Para ello, se pueden consultar distintos mapas históricos y cartográficos, procedentes de la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) o del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC). Esto permite la contextualización histórica y arqueológica del estudio de los yacimientos desde una perspectiva tanto terrestre como marítima (Picornell, 2012; Gómez, 2018; Gómez-Muñoz, 2019).

#### **8.4.4. Fase 4. Los métodos complementarios a la prospección**

##### *8.4.4.1. El Análisis SIG*

Desde hace décadas los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta útil tanto para plantear nuevas hipótesis de estudio como para reinterpretar los contextos arqueológicos ya conocidos (Dourteau, Andreo y Garrido, 2021). Ciertamente, y como en cualquier investigación arqueológica, será a partir de las preguntas e hipótesis formuladas en nuestro estudio cuando intentemos conocer los modos de vida de las sociedades del pasado (Cerezo, 2016).

En lo que respecta al uso del SIG en el estudio de las cavidades cársticas sumergidas, este sistema ha demostrado ser muy valioso para el almacenamiento y gestión de información de las cuevas y del propio carst. También ha resultado ser una herramienta efectiva para el desarrollo de mapas y análisis territorial, lo cual contribuye al proceso de toma de decisiones para generar políticas y normativas en lo que respecta a la preservación de estos recursos únicos (Kincaid, 2000; Szukalski y Glasspool, 2007).

Por ejemplo, en nuestra investigación, el uso del SIG se focalizó en la geolocalización y el geoposicionamiento terrestre del yacimiento respecto a las topografías de las cuevas sumergidas. El programa SIG utilizado fue QGIS<sup>118</sup>, software de código libre que puede ser utilizado por las plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows y que permite manejar formatos raster y vectoriales, así como bases de datos.

Por consiguiente, recomendamos el uso del SIG, ya que gracias a él se pudieron introducir todos los datos recopilados por; I) los sistemas de mapeo por hilo MNEMO, II) por el GPS subacuático del ENC2 de SEACRAFT, III) por los dispositivos de radiolocalización y IV) por las fuentes bibliográficas consultadas. Además, los programas SIG son compatibles con otros programas de topografía de cuevas como Compass2, Wintopo, Survex3 y WinKarst4 y ARIANE. Este último el software más consultado y utilizado en nuestra investigación prospectiva y arqueológica.

#### 8.4.4.2. El uso de drones

El uso de drones, como herramienta de documentación, está muy extendido en la arqueología terrestre debido a las múltiples ventajas obtenidas con la fotografía aérea u ortofoto (Acosta y Jiménez, 2013; Sampietro, 2018; Díaz *et al.*, 2019). En lo que respecta al estudio arqueológico de las cavidades sumergidas, los datos obtenidos por este medio sirven para comprender e interpretar la evolución del contexto general territorial del yacimiento. Con la toma de fotografías a escala microespacial, en vuelos a baja altura, se pueden generar fotogrametrías, ortofotografías y planimetrías más realistas de las dimensiones de las cuevas y de su área arqueológica de influencia que las aportadas por la metodología tradicional (Díaz *et al.*, 2019), pero además a través de la documentación videográfica se consigue la difusión de las imágenes con fines tanto científicos como divulgativos.

---

<sup>118</sup> [www.qgis.org/es/site/](http://www.qgis.org/es/site/)

En nuestro caso, tanto en las cuevas de Mallorca como en las de Colls- Miralpeix y Garraf, una de las últimas actividades realizadas para finalizar los trabajos de prospección y documentación arqueológica fue la realización de un vuelo con dron para la captura de imágenes, con el fin de enumerar las futuras áreas de intervención, el área de influencia arqueológica respecto al abastecimiento de agua y la identificación de sitios arquitectónicos cercanos a las entradas cegadas de las cuevas (Fig. 159).



**Figura 159.** El piloto de dron, Enrique Sala, ajustando y calibrando el dispositivo antes del vuelo sobre la cova del Gegant. (Foto; Autor).

Así, nuestra recomendación pasa por el uso de este dispositivo como método de documentación y difusión, pues ayuda a la recopilación de datos, mediante la captación de imágenes aéreas, y ayuda a la contextualización del conjunto, aunque ciertamente su uso a nivel prospectivo es perfectamente prescindible.

#### 8.4.4.3. *Análisis sedimentológico con sondeos estratigráficos*

Dentro de los métodos complementarios, la extracción de muestras estratigráficas del subsuelo sumergido es el único que nos permite localizar, ubicar y estudiar

indicadores antrópicos sumergidos, siempre y cuando la recolección de muestras procedentes de sondeos estratigráficos provengan de suelos no alterados (Gàmez, 2007; J. Daura *et al.*, 2010; Rocha *et al.*, 2014; Aguilar, Granado y Barrera, 2015).

En nuestro caso, se trató de extraer sondeos con testigo o estudiar los ya extraídos en campañas de investigación pasadas en todas las cuevas prospectadas, ya que el criterio metodológico se basó en que, cuando se producen asentamientos humanos, los sedimentos se enriquecen con distintos indicadores mineralógicos específicas como pueden ser los minerales arcillosos calentados o por conjuntos de restos de origen antropogénicos.

Nuestra recomendación, es utilizar y optimizar este método, siempre que sea posible, ya que puede aportar mucha información tanto del propio yacimiento como del área sumergida donde éste se encuentra ubicado.

#### 8.4.4.4. *El análisis de la cerámica*

La dificultad en la búsqueda de restos cerámicos en las diferentes cuevas sumergidas prospectadas, durante las campañas de trabajo realizadas, es causada por el alto grado de expolio arqueológico que han sufrido estas cavidades en las últimas décadas (Sánchez, 2013; Morales, 2015).

Tan solo a través de la consulta bibliográfica de estudios pretéritos sobre las características y morfología de las piezas cerámicas extraídas en investigaciones y exploraciones anteriores podremos entender y contextualizar los yacimientos sumergidos analizados. Uno de los casos más paradigmáticos es el de la cova de la Font de Ses Aiguades, ya que después de extraerse casi 200 piezas cerámicas y depositarlas en los almacenes del Museo de Mallorca a principios de los años 90, gracias al estudio de la cerámica, pudimos consultar artículos y bases de los datos para establecer una cronología relativa. Además, gracias también al análisis de los materiales utilizados, como arcillas y desgrasantes pudimos definir el origen geográfico de los restos cerámicos, su extensión cultural y las redes comerciales que existían (Gràcia *et al.*, 2001; Colom y Járrega, 2018, 2020).

Por esta razón, y siempre que sea posible, nuestra recomendación es consultar bases de datos, bibliografía y artículos específicos sobre los restos cerámicos encontrados y cotejarlos con los encontrados en nuestra prospección, de este modo partimos desde un punto de investigación sólido que nos ayudará a la contextualización del yacimiento en todos sus ámbitos.

#### 8.4.4.5. Aplicación de la colorimetría en el estudio arqueológico

En la actualidad, recientes estudios en fotografía subacuática tratan de analizar los diferentes modelos de recuperación de colores en la captura de imágenes, identificar las variables ambientales que afectan la captura de las imágenes subacuáticas y proponer algoritmos de recuperación de color para procesar fotografías subacuáticas (Silva, 2022). Esta es una de las razones por el que la aplicación de la colorimetría no está generalizada en el estudio fotográfico arqueológico de las piezas cerámicas sumergidas, ya que la nitidez y los colores percibidos por la cámara dependerán del color y turbidez del agua donde nos encontremos.

En nuestro caso, la colorimetría fue utilizada para la identificación de posibles marcas o *tituli pictus* en la cerámica sumergida localizada en la cova de la Font de Ses Aiguades. Gracias a la extensión DStretch<sup>119</sup> del programa Image-J, esta herramienta fue de gran utilidad para la identificación y documentación de marcas a través del análisis de imágenes multiespectrales (Martínez, 2010). El programa D-Strech opera realzando diferentes tonalidades y posibilita diferenciar los tipos de inscripción presentes en una pieza, a través de la variación en la intensidad y tonalidad (Martínez, 2010).

El objeto concreto por identificar en la cova de la Font de Ses Aiguades, en nuestro estudio colorimétrico, se trataba de un ánfora Dressel 2-4 Tarraconense que contaba con un *titulus pictus* concreto (Fig. 132).

El uso de la colorimetría ayuda en la identificación de características específicas de las piezas arqueológicas. Nuestra recomendación al respecto es que ésta es una

---

<sup>119</sup> <https://www.dstretch.com/>

técnica sencilla, de bajo coste y que puede aportar valor a nuestra investigación cuando surgen ciertas dudas sobre el color de la pasta de la cerámica o sobre una posible marca o inscripción en la misma.

#### 8.4.4.6. *El estudio de los restos paleontológicos*

Los depósitos submarinos, especialmente en cuevas freáticas, a menudo contienen fósiles muy bien preservados. La recuperación de fósiles de dichos depósitos requiere de una capacitación especializada, equipos técnicos y humanos y procedimientos propios para estos entornos confinados (Andrews, 1960; De Anda, 2003; Huber, 2009; García, 2014; Arroyo-Cabrales *et al.*, 2015; Rissolo *et al.*, 2015; Martos, 2018; De Anda, Ortega y Brady, 2019; Barba-Meinecke, Pizá Chavez y Quetz León, 2022).

A nivel general, los estudios tafonómicos de conjuntos submarinos son raros y están obstaculizados por las dificultades en la recuperación de fósiles. Sin duda, la paleontología en contextos submarinos representa una fuente de fósiles, en gran parte inexplorada pero significativa, cuyo estudio adicional amplía y enriquece los enfoques tradicionales en el estudio de organismos antiguos (Louys, 2018).

Actualmente, son muchos los proyectos en cavidades sumergidas, sobre todo centrados en la península del Yucatán (México) donde los estudios paleontológicos son indivisibles a los arqueológicos ya que ofrecen una fuente importante de información tanto de la propia cavidad como de los aspectos generales de los yacimientos sumergidos (Andrews, 1960; De Anda, 2003; Huber, 2009; García, 2014; Arroyo-Cabrales *et al.*, 2015; Rissolo *et al.*, 2015; De Anda, Ortega y Brady, 2019; Barba Meinecke, 2020; Barba-Meinecke, Pizá Chavez y Quetz León, 2022)

En nuestro caso, las investigaciones paleontológicas, aunque no eran nuestra prioridad, estaban ya documentadas y publicadas tras los hallazgos óseos de *Myotragus balearicus* en las cova de la Font de Ses Aiguades como en la cova Genovesa (Gràcia *et al.*, 2003; Bover y Ramis, 2005; Palombo *et al.*, 2006).

Nuestra recomendación parte de la premisa que, todo resto paleontológico debe ser documentado, al menos gráficamente, puesto que debemos dar constancia a las autoridades de patrimonio de la existencia de remanentes óseos. Su estudio concreto dependerá del alcance del proyecto, de los permisos obtenidos y de los criterios de investigación predeterminados.

#### 8.4.4.7. Estudio del perfil hídrico con sonda CDT

Dentro de los métodos complementarios a la prospección para aumentar el conocimiento de los yacimientos sumergidos en cuevas cársticas el estudio del perfil hídrico es uno de los más relevantes, ya que tanto las hipótesis arqueológicas, históricas como de conservación in situ pueden ser contrastadas, valoradas y defendidas si conocemos los aspectos analíticos del agua de la cueva. Por este motivo, los datos de temperatura, salinidad y profundidad del agua se pueden medir a través de una lectura con una sonda CTD (Rana y Navy, 2008; Arfib *et al.*, 2016). Debemos tener presente que la conservación de los materiales sumergidos como la madera, la cerámica o los materiales orgánicos dependerá de las propiedades intrínsecas del agua en esa ubicación concreta (Fernández, 2003; García-Castrillo, Lanuza y López, 2003). Es por esta razón que, los datos obtenidos por el CTD nos indicaran las características del medio y nos generaran diferentes protocolos de actuación dependiendo de los valores obtenidos.

Nuestra recomendación, es el uso de este dispositivo en cavidades donde no se hayan registrado anteriormente estos parámetros ya que los datos obtenidos ayudan a conocer más las características y calidad del agua permitiendo generar y validar hipótesis históricas que ayuden a completar y contextualizar nuestro estudio arqueológico.

#### 8.4.4.8. El análisis de agua (biológico y químico)

Por último, y como método de muestreo complementario auxiliar, se propone el análisis químico y biológico del agua fundamentalmente como método de

prevención en la seguridad e higiene de los arqueólogos subacuáticos y de los espeleo-buceadores. Además, esto nos permite comprobar su potabilidad y sus características intrínsecas, lo cual corroborará o descartará posibles hipótesis históricas y arqueológicas.

Nuestra recomendación al respecto es que esta es una técnica utilizada solo para responder preguntas e hipótesis concretas de la cavidad, debiendo valorar si las condiciones físicas y químicas del agua variaron desde su utilización en el pasado hasta nuestros días. No consideramos que sea un método baladí, pero sí que es prescindible si su análisis no permite la contextualización del yacimiento sumergido en nuestra investigación.

#### **8.4.5. Fase 5. Los métodos de divulgación**

Una de las fases más importantes por la que debe pasar obligatoriamente cualquier tipo de proyecto científico arqueológico y subacuático es el de la difusión en todos los campos, ya que es el principal medio para dar a conocer los resultados de la investigación realizada (Castillo-Belinchón, 2006; Torres y Delgado, 2009; Sáez, 2016). En el caso del estudio arqueológico del patrimonio sumergido, por lo que se refiere al público no especializado, es necesario focalizar los esfuerzos en esta divulgación de los resultados, puesto que el retorno social es importante. Ciertamente, en las últimas décadas, la arqueología dispone de diferentes métodos de difusión de resultados, mediante la aplicación de componentes de divulgación integrales, éticos y bien diseñados para generar un impacto positivo en el público. Esto ha permitido que el conocimiento científico arqueológico trascienda más allá de la transmisión de información, logrando que se generen múltiples experiencias para formar vínculos entre las personas y el conocimiento, provocando la construcción de una base sólida para el proceso de apropiación social del conocimiento (Velandia, 2020).

Como hemos comentado, la divulgación de los estudios científicos no debe quedar tan solo contemplados en el ámbito académico de estudiosos de la arqueología o en historiadores especialistas en un temática y cronología concreta, sino que la difusión de los resultados científicos debe llegar al público en general, de distintos

modos y a través de distintas vías. Estudios recientes en esta materia han llegado a la conclusión que los trabajos divulgados por cauces tradicionales puedan ser reaprovechados en otros circuitos ya que también tienen cabida en el puzzle de las tecnologías 2.0. (Torres y Delgado, 2009; Velandia, 2020).

De esta forma, un trabajo científico difundido en medios formales llegará a su comunidad natural, siendo reconocido su valor mediante la citación, pero, además, conseguirá notoriedad si se difunde con las herramientas de la web social, ya que éste cobrará una nueva vida, con una mayor audiencia potencial y un público más diversificado, como pueden ser los colectivos profesionales. Es por esta razón que la transmisión del conocimiento de la investigación arqueológica no debe finalizar con la publicación científica de un manuscrito sino que se debe extender más allá, con la mayor publicidad posible de su trabajo en todos los medios posibles (Torres y Delgado, 2009) (Fig. 160).



**Figura 160.** Actividades de divulgación y difusión de resultados científicos para el público no especializado. Fuente; (Velandia, 2020).

Es por esta razón por la que, los resultados obtenidos en las prospecciones de las diferentes campañas se presentaron en primer lugar a las autoridades de Patrimonio y Medio Ambiente para, posteriormente, redactar publicaciones en

revistas indexadas, presentar comunicaciones y conferencias en congresos de arqueología subacuática enfocados todos dentro de un contexto académico, concretamente sobre los avances metodológicos en la arqueología prehistórica subacuática en cavidades cársticas inundadas (Fig. 161).



**Figura 161.** Presentación de los resultados del Proyecto IASCM al IV Simposio Internacional de Historia y Arqueología Marítimas. Uniendo a través de mares y océanos. (noviembre 2019. Cartagena-Murcia) (Foto; Autor).

Y, aunque mayoritariamente las actividades de divulgación y difusión se llevaron a cabo en congresos y simposios sobre arqueología, también se realizaron conferencias de carácter divulgativo en diferentes contextos, tales como universidades, recintos culturales, centros de buceo y organizaciones sociales. La intención final fue la de transmitir la necesidad de respetar los entornos frágiles, como las cavidades cársticas sumergidas, y proteger el patrimonio y la riqueza histórica, arqueológica, geológica y cultural del interior de las cuevas (Fig. 162).

# AVANCES METODOLÓGICOS APLICADOS A LA ARQUEOLÓGICA PROSPECTIVA EN CAVIDADES SUMERGIDAS

## EL PROYECTO IASCM

**OBJETIVOS**

EL OBJETIVO PRINCIPAL ES RESPONDER PREGUNTAS CONCRETAS SOBRE LA UBICACIÓN EXACTA DE LOS YACIMIENTOS, SU REMANENTE MATERIAL Y LA METODOLOGÍA ARQUEOLÓGICA MÁS SEGURA Y ÚTIL, ABRIENDO ASÍ, NUEVAS VÍAS DE INVESTIGACIÓN

**LAS CUEVAS Y SUS YACIMIENTOS**

LA GRAN MAYORÍA DE RESTOS ARQUEOLÓGICOS ENCONTRADOS EN ESTAS CUEVAS SUMERGIDAS MALLORQUINAS RESPONDEN AL USO COMO PUNTOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE. LA DESAPARICIÓN DE MUCHOS DE SUS ACCESOS ENDOKARSTICOS, HA PROVOCADO QUE APAREZCAN RESTOS ARQUEOLÓGICOS A CENTENARES DE METROS DE LAS ENTRADAS ACTUALES



**I CONGRESO  
IBEROAMERICANO  
DE ARQUEOLOGÍA  
NÁUTICA Y  
SUBACUÁTICA**



**CUEVA DE SES AIGUADES**



**LECTOR DE HILO MNEMO**



**SISTEMA DE RADIOLOCALIZACIÓN PINGER**

**DISPOSITIVOS UTILIZADOS**

**LECTORES DE HILO: MNEMO**  
DISPOSITIVO DE PROSPECCIÓN POR LÍNEA CAPAZ DE REALIZAR UN MAPEO DE LA RUTA EN LA CUEVA A TRAVÉS DEL SEGUIMIENTO DEL HILO-GUÍA. LOS DATOS SE TRANSMITEN POR CABLE AL SOFTWARE EN LÍNEA ARIANE, QUE INTERPRETA LOS DATOS Y LOS TRANSPORTA A UN SOPORTE GEOGRÁFICO

**EL SISTEMA DE RADIOLOCALIZACIÓN PINGER**  
TRANSMISOR DE RADIOLOCALIZACIÓN SUBTERRÁNEO QUE ENVÍA UNA SEÑAL VERTICAL HACIA EL EXTERIOR DE LA CAVIDAD ATRAVESANDO EL TECHO ROCOSO, CAPTADA POR UNA ANTENA DE RECEPCIÓN.

**EL SISTEMA DE NAVEGACIÓN GPS ENC2 DE SEACRAFT ES UN POTENTE Y COMPACTO SISTEMA DE NAVEGACIÓN SUBMARINA DOTADO DE PRECISOS GIROSCOPIOS Y ACCELERÓMETRO 3 D, MAGNETÓMETRO, Y SENSORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA. FIJADO SOBRE EL SCOOTER DEL ESPALDO DEL BUZCADOR, REGISTRA LA RUTA, MIDRIENDO LAS DISTANCIAS EN TODO MOMENTO Y PERMITIENDO AL USUARIO VOLVER AL PUNTO DE PARTIDA SI ES NECESARIO**

**FOTOGRAFÍA**  
NECESITAMOS UN EQUIPO AVANZADO EN FOTOGRAFÍA E ILUMINACIÓN PARA TRABAJAR EN CONDICIONES EXTREMAS DE Poca VISIBILIDAD, HALOCLINA, SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN Y ESPACIOS CONFINADOS

**FOTOGRAMETRÍA**  
LA GÉNESIS DE ABERRACIONES EN EL MODELADO DE LA MALLA SE AGRAVA EN LOS AMBIENTES KARSTICOS DE Poca VISIBILIDAD CAUSADA POR EL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN, LO QUE PROVOCA FALTA DE NITIDEZ EN LAS FOTOGRAFÍAS, IMPIDIENDO SU SOLAPAMIENTO EN EL SOFTWARE: AGISOFT METASHAPE

**EL ANÁLISIS CTD DEL AGUA**  
LOS ANÁLISIS QUÍMICOS CON Sonda CTD, QUE REGISTRA CONDUCTIVIDAD, TEMPERATURA Y PROFUNDIDAD A LA QUE SE ENCUENTRA SUMERGIDO EL DISPOSITIVO EN CADA MOMENTO, NOS DA LOS PERFILES DE LA COLUMNA DE AGUA, CONOCIENDO: PRESIÓN, O<sub>2</sub> DISUELTUO Y TURBIDEZ

**CONCLUSIONES**  
DEMOSTRAMOS LA POSIBILIDAD DE ALCANZAR UN MÉTODO PROSPECTIVO VIABLE Y ECONÓMICO PARA GEORREFERENCIAR EL ENTORNO DEL YACIMIENTO. EL CÁLCULO COMPARATIVO ENTRE UN SISTEMA DE MAPEO POR HILO Y UN SISTEMA DE RADIOLOCALIZACIÓN TIENEN UN PORCENTAJE DE COINCIDENCIA ELEVADO, QUE VERIFICA LA CONSECUENCIA DE COORDENADAS APROXIMADAS. TODO ELLO COMPLEMENTADO POR LOS DATOS DEL RESTO DE LECTURAS ADICIONALES. LA CONCLUSIÓN MÁS RELEVANTE ES QUE NINGÚN MÉTODO PUEDE CONSIDERARSE COMPLETAMENTE VERDÍCO Y FIABLE. TODAS LAS LECTURAS HAN DE COMPLEMENTARSE, COMPARARSE Y CONTRASTARSE

**PARTICIPAN:**







**AUTOR: MANEL FUMÁS SOLDEVILLA**  
**E-MAIL: MJFUMAS@GMAIL.COM**

Figura 162. Póster presentado en el I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática (Cianys) en octubre de 2021. Fuente; elaboración propia.

Por último, y en ciertas ocasiones, la relevancia de los proyectos científicos alimenta la curiosidad de periodistas de los distintos medios de comunicación nacionales e internacionales, sobre todo cuando los hallazgos arqueológicos tienen una notoriedad o presentan cierto halo de misterio. Concretamente, este fue el caso de los descubrimientos arqueológicos en la cova de la Font de Ses Aiguades en Alcúdia (Mallorca) donde la revisión del yacimiento hizo que aflorara una curiosidad inusitada por decenas de medios de comunicación. Esto que en un principio no debería tener ninguna contrapartida ni contrariedad no suele ser en ocasiones aceptable. La facilidad para tergiversar las informaciones y la arbitrariedad y poca rigurosidad de ciertos medios de comunicación puede enmascarar y difuminar la percepción del ciudadano respecto a las características específicas de la investigación arqueológica llevada a cabo<sup>120</sup>.

Nuestra recomendación pasa por una divulgación responsable en revistas indexadas, donde prime la objetividad y la rigurosidad científica tanto a nivel nacional como internacional. De este modo, arqueólogos, historiadores, estudiantes y público en general, de cualquier parte del mundo, podrán consultar y rebatir los datos obtenidos en nuestro trabajo de investigación.

---

<sup>120</sup><https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-8019835/Around-200-ancient-Roman-amphora-used-store-wine-discovered-underwater-cave.html>

<https://web.de/magazine/wissen/geschichte/sensationsfund-hoehle-mallorca-200-amphoren-tierknochen-entdeckt-34447088>

<https://tv24.iol.pt/internacional/ciencia/o-misterio-da-gruta-subaquatica-com-quase-200-anforas-em-maiorca>

[https://elpais.com/cultura/2020/02/11/actualidad/1581425897\\_753734.html](https://elpais.com/cultura/2020/02/11/actualidad/1581425897_753734.html)

<https://www.diariodemallorca.es/cultura/2020/02/23/cueva-alcudia-unica-mundo/1488654.html>

[https://www.cope.es/programas/la-tarde/noticias/tesoro-forma-anforas-20200219\\_625490](https://www.cope.es/programas/la-tarde/noticias/tesoro-forma-anforas-20200219_625490)

<https://www.20minutos.es/noticia/4155632/0/arqueologos-perplejos-yacimiento-romano-anforas-agua-baleares-mallorca/>

<https://www.youtube.com/watch?v=vXlXZVuNFE&t=1s>

<https://www.ccma.cat/tv3/alacarta/telenoticies-vespre/ses-aiguades-es-la-cova-submergida-amb-restes-arqueologiques-mes-important-deuropa/video/6034363/>



## CAPÍTULO 9

# CONCLUSIONES

*La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza  
de aplicar los conocimientos en la práctica.*

*Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.)*

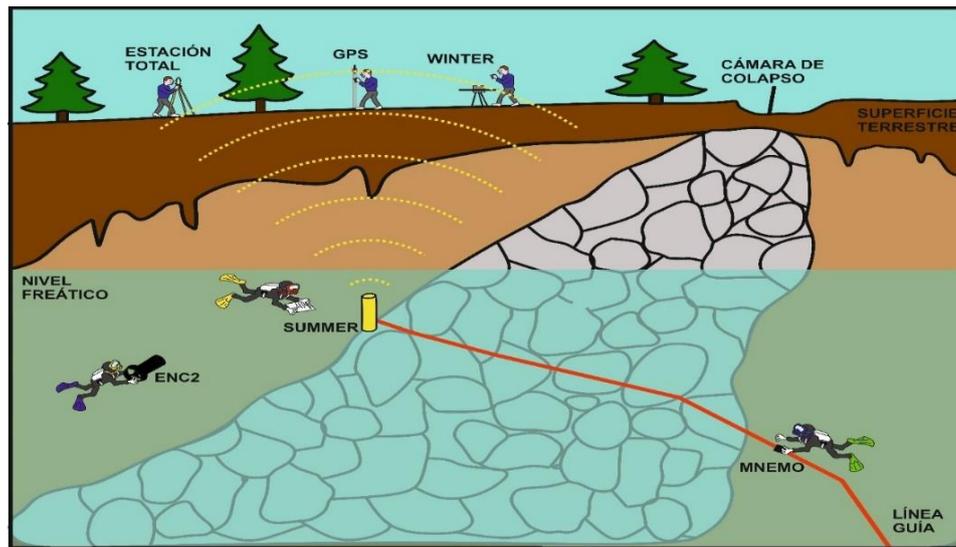
## 9. CONCLUSIONES

La principal conclusión a la que hemos llegado en la presente tesis es que los resultados a obtener en la prospección arqueológica de una cavidad sumergida dependerán de los recursos técnicos, humanos, logísticos y sobre todo económicos que podamos utilizar en cada una de las investigaciones.

El carácter práctico del estudio proyectado en estas líneas, visto como una investigación arqueológica prospectiva no intrusiva, ha tenido el objetivo final de narrar el proceso de las distintas etapas vividas durante la gestión, la administración y la consecución de varios proyectos de prospección, basados en la mejora metodológica y técnica de la arqueología subacuática en cuevas sumergidas.

Para tratar de mejorar el conocimiento tanto metodológico como histórico de las cuevas sumergidas a estudio se han utilizado herramientas electrónicas y dispositivos de prospección de última generación en; fotogrametría, mapeo por hilo, GPS subacuático, ecosondas, radiolocalización, radiogoniometría, topografía y sistemas de información geográfica (SIG). Con estas técnicas se ha pretendido contextualizar histórica, arqueológica y geográficamente los yacimientos arqueológicos descritos, los cuales todavía permanecen dentro de estas cavidades inundadas. Al mismo tiempo, hemos intentado avanzar en un estudio metodológico topográfico y prospectivo fácil, completo y seguro que pudiera extrapolarse a cualquier cavidad cárstica sumergida, intentando generar protocolos de actuación extrapolables, útiles y rápidos (Fumás, 2021, 2022a, 2022b; Fumás *et al.*, 2022).

La búsqueda de un concepto de prospección total en la arqueología subacuática en cavidades sumergidas pasa irremediablemente por el conocimiento del punto 0 de referencia o coordenada exacta de la ubicación del yacimiento, tanto en el interior de la cavidad como en superficie. Para ello, el presente trabajo defiende la “prospección arqueológica topográfica” como un paso ineludible en la recopilación de datos científicos para el geoposicionamiento correcto del yacimiento (Fig. 163).



**Figura 163.** Dibujo esquemático general de las diferentes metodologías prospectivas utilizadas en las campañas de trabajo. (Autor; Antonio J. Talavera).

En las investigaciones desarrolladas en esta tesis la suma de todos los métodos prospectivos utilizados, mediante el uso de mediciones manuales y dispositivos electrónicos, puede que no hayan sido garantía de éxito en su totalidad, pero lo cierto es que los criterios prospectivos a seguir han sido coincidentes en lo que se refiere a metodología y objetivos.

La definición más habitual sobre prospección arqueológica subacuática es la de un conjunto de trabajos de campo y laboratorio dirigidos a la búsqueda y estudio de yacimientos sumergidos sin remoción del terreno (León, 2003; De Juan, 2009). En nuestro caso, la definición más acertada, y que defiende la presente investigación sobre los trabajos realizados en la prospección topográfica subacuática aplicada a la arqueología en cavidades sumergidas sería la de; un conjunto de trabajos de campo dirigidos a la búsqueda y georreferenciación interna, o subterránea, de cualquier resto arqueológico remanente, siendo además necesario su documentación y estudio sin remoción del terreno.

Este tipo de prospección debe ser considerada siempre el paso previo a cualquier otro tipo de intervención arqueológica dentro de la cavidad y como un método más de contextualización del yacimiento con su entorno inmediato y global.

Sin lugar a duda, este tipo de prospección crea sinergias entre la investigación histórica-arqueológica clásica y la investigación técnica-metodológica, con el fin último de crear una simbiosis entre ellas que nos permita discernir y escoger entre diferentes técnicas prospectivas dependiendo de los objetivos, la tolerancia topográfica asumible, la morfología de la cavidad y el entorno arqueológico que tratemos de estudiar, siendo capaces de entender la dinámica y el contexto histórico en el que nos movemos.

La importancia de la georreferenciación aplicada al estudio de yacimientos en cuevas sumergidas va desde la obtención de resultados en su topografía interna hasta el conocimiento de su contexto espacial, ya sea local o global, pasando por la comparación de cartografías o datos espaciales, hasta llegar a proporcionar una plusvalía en lo relativo a la seguridad ligada a la campaña subacuática de campo.

Los resultados obtenidos aquí proporcionan una ubicación espacial factible de ser utilizada no solo en arqueología, sino también en el espeleo-socorro puesto que las prospecciones realizadas no solo han generado datos reales fiables, sino que también pueden considerarse investigaciones preliminares ante cualquier intervención subacuática que se proponga en un futuro (Fumás, 2022a).

Sin duda, el presente trabajo demuestra la posibilidad de alcanzar un método topográfico viable y relativamente económico que logre georreferenciar no solo el yacimiento arqueológico sino también la dispersión de material remanente en el mismo. Para ello se contempla en esta exposición un método donde el cálculo comparativo entre un sistema de mapeo por hilo y un sistema de radiolocalización tengan un porcentaje de coincidencia elevado, lo cual verificará la consecución de unas coordenadas rigurosamente aproximadas.

La conclusión más relevante es que “ningún método puede considerarse completamente verídico y fiable”, por ello han de utilizarse diferentes metodologías de observación para que los resultados obtenidos puedan ser comparados y contrastados (Fumás, 2022a, 2022b; Fumás *et al.*, 2022).

Los dispositivos de radiolocalización, el mapeo por GPS del ENC2 y la topografía clásica manual presentan diferentes carencias que por sí mismas no pueden ser paliadas pero que igualmente ofrecen resultados óptimos de menor exactitud en su medición.

A nuestro entender el sistema de mapeo por hilo MNEMO resulta el método más eficaz y viable, siempre y cuando se consiga la línea de mapeo de ida y de vuelta, y ésta pueda someterse a un cálculo compensado mediante la obtención de las coordenadas de los puntos de inicio y final de la línea con elevada precisión, ya sea utilizando solamente la topografía convencional de superficie o combinada con el método de radiolocalización. Por otra parte, gracias a estas observaciones y al conocimiento de las coordenadas cartesianas podemos identificar y georreferenciar los puntos de aguada ocultos, extrapolando nuestro cálculo al esquema de racionalidad espacial de los antiguos poblados prehistóricos circundantes, respecto a sus puntos de abastecimiento de agua, y complementando así nuestra investigación con un posterior estudio cerámico analítico de los restos sumergidos en las distintas zonas de la cavidad (Fig. 164).



**Figura 164.** Vista frontal del derrumbe de la Sala de los Moros desde la Galería Cinc Cents en la cual se han basado parte de los estudios prospectivos del presente trabajo con la utilización y medición de los distintos dispositivos de mapeo utilizados. (Foto; Florian Huber).

De igual modo, otra de las conclusiones a las que hemos llegado en nuestro estudio es en la necesidad de conseguir, si los medios económicos y logísticos del proyecto lo permiten, una fotogrametría escalada, orientada y geo-posicionada del yacimiento arqueológico sumergido. Así, el empleo de técnicas de registro y georreferenciación combinadas con la fotogrametría mejoran exponencialmente las planimetrías y topografías manuales y proporcionan la geolocalización espacial del yacimiento en el interior de la cavidad, permitiendo generar hipótesis históricas y arqueológicas gracias a la contextualización del paisaje. La fotogrametría y la obtención de una coordenada real de referencia también nos ha facilitado la geometría y el geoposicionamiento de cada una de las piezas cerámicas sumergidas, gracias a programas avanzados en fotogrametría como el Agisoft Metashape Professional. Esto nos ha permitido tanto la contextualización general del yacimiento como de las piezas individuales, respecto a la topografía de la cueva, generando modelos tridimensionales y de visualización 3D. Estos modelos se pueden visualizar mediante aplicaciones como Dronelab o Constructed donde se puede medir el modelo fotogramétrico 3D y la distribución de material alrededor del mismo, posibilitando identificar las piezas arqueológicas sobre el mismo yacimiento y completar la base de datos deseada.

Por último, consideramos importante una última fase que sería el estudio arqueométrico posterior de las muestras recogidas durante la inmersión, lo cual permitirá una contextualización completa del yacimiento. Uno de los análisis más concluyentes es el micro-geoarqueológico, aplicado a las unidades estratigráficas extraídas del paleosuelo sumergido. Éste nos aportara información importante sobre los periodos de inundación y sobre el uso antrópico de la cavidad (Gàmez, 2007; J. Daura *et al.*, 2010; García, 2014; Rocha *et al.*, 2014; Barba Meinecke, 2020; Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021).

En conclusión, tan solo mediante un protocolo de trabajo riguroso, un equipo técnico y humano profesional, una viabilidad económica que soporte los diferentes imprevistos que se van generando en un proyecto centrado en la documentación fotogramétrica georreferenciada y unos estándares de seguridad estrictos se puede dar por efectiva una metodología de trabajo viable, siendo completamente extrapolable esta metodología al registro arqueológico en cenotes y yacimientos en cavidades sumergidas en cualquier parte del mundo.

## CAPÍTULO 10

# FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN

*“Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado”.*

*Albert Szent-Györgyi (1893 – 1986)*

## 10. FUTURO DE LA INVESTIGACIÓN

La prospección arqueológica subacuática en cavidades sumergidas y la metodología utilizada recientemente en las investigaciones llevadas a cabo tanto en Europa como en Centroamérica nos permiten ser optimistas respecto al futuro en esta materia.

La realidad es que, todavía quedan muchos retos a los cuales debemos hacer frente, tanto metodológicos, burocráticos, económicos y humanos, pero los avances científicos en lo que respecta a los avances técnicos y electrónicos facilitaran la prospección subacuática haciéndola más breve y segura.

El paradigma de la investigación pasa por la mejora en varias materias como; la espeleometría (Valdivieso, 2022), la topografía subacuática (Izaguirre, 2010; Martín-Bueno y Sáenz, 2017), la georreferenciación de los restos materiales, arqueológicos y paleontológicos sumergidos (Fumás, 2022b, 2022a; Fumás *et al.*, 2022) y el análisis micro arqueológico del subsuelo del yacimiento (Ogloblin, Galili y Shahack-Gross, 2021).

La aparición de nuevos dispositivos de mapeo subacuático como; la nueva versión del MNEMO, el ENC3 de SEACRAFT y el desarrollo AUV autónomos como el BOXFISH o el SUNFISH, capaces de tomar sus propias decisiones más allá de las misiones programadas, podrán alcanzar nuevos horizontes en la prospección sin temor a pérdidas humanas ni preocupaciones por la calidad y visibilidad del agua. Además, dispositivos como los georradars y nuevos dispositivos de radiolocalización más avanzados y ligeros podrán ubicar en la superficie terrestre los yacimientos sumergidos mucho más fácilmente que en la actualidad (Fiorani *et al.*, 2000; Fernández, 2011; Lasaponara *et al.*, 2014; Petriaggi y De Ayala, 2015; Leandro y Díez de la Rubia, 2017).

Por otro lado, las nuevas técnicas de registro y georreferenciación, como la fotogrametría avanzada aquí mostrada (Fumás *et al.*, 2022) permitirá un cambio importante en la identificación, clasificación y ubicación de los remanentes arqueológicos sumergidos, permitiendo recuperar o estudiar tanto el yacimiento en su totalidad como piezas específicas dentro del mismo.

Pero, si algo ha pretendido este estudio es crear las bases para un futuro en lo que se refiere a la generación de un protocolo de actuación y prospección real, donde no quepan las interpretaciones subjetivas de distintos equipos de investigación y donde la obtención de mediciones y datos puedan ser cotejables y comprobadas por otros investigadores ajenos a los del proyecto original. De este modo, se permitirá retomar la investigación o el estudio en el punto concreto donde quedó sin necesidad de repetir intervenciones ya realizadas previamente.

Por este motivo, es necesario la generación de una base de datos real, tanto de las zonas arqueológicas como de las zonas de servidumbre, con un protocolo de actuación serio y riguroso que priorice la seguridad del espeleo-buceador y preserve el yacimiento arqueológico, no solo de actividades ilícitas sino también de actividades legítimas (García *et al.*, 2019).

Los primeros pasos ya se han propuesto en esta tesis siguiendo las recomendaciones de investigadores con una larga trayectoria científica (De Anda, 2003; De Juan, 2009; Nieto, 2009; Bosch, Chinchilla y Tarrús, 2011; García, 2014; Huber, 2014; Rissolo *et al.*, 2015; Gràcia, 2015; Flemming y Antonioli, 2017; Barba Meinecke, 2020; Barba-Meinecke, Pizá Chavez y Quetz León, 2022), pero éstos tan solo deben ser los primeros de muchos más hasta conseguir poner en valor tanto la propia metodología de estudio como el propio yacimiento sumergido.

Además, debemos reforzar la idea y la importancia de tener muy en cuenta la arqueología del paisaje terrestre (Rodríguez Alcalde, 1995; Criado, 1999; Picornell, 2012) y del paisaje cultural marítimo (Cerezo, 2016; Gómez, 2018; Gómez-Muñoz, 2019) como medios auxiliares de contextualización de los yacimientos sumergidos con su entorno, creando la posibilidad de generar nuevas hipótesis históricas que complementen o sustituyan a las actuales. Para ello, deberemos continuar dando una gran importancia a los sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta fundamental donde aunar todos los datos recogidos en el trabajo de campo mientras se proponen nuevas propuestas e hipótesis históricas (Dourteau, Andreo y Garrido, 2021).

Tan solo a través de la generación de equipos de investigación profesionales y de la confianza en los proyectos por parte de las autoridades competentes, tanto a

nivel administrativo, económico, y divulgativo, será posible continuar con la generación de protocolos de actuación arqueológica, en lo que a prospección subacuática en cavidades confinadas se refiere, mientras se avanza en la protección del Patrimonio Cultural Sumergido (PCS) y se defienden los yacimientos contra el expolio y las malas praxis (Castillo-Belinchón, 2006; Sánchez, 2013).

Por último, debemos reivindicar la figura del “arqueólogo espeleo-buceador” como el profesional en materia de arqueología subacuática capaz de estudiar estructuras históricas, económicas y sociales del pasado a través de la prospección y excavación subacuática en cavidades sumergidas, además de ser capaz de recopilar e investigar los elementos de cultura material sumergidos en estos ámbitos cársticos. Esta figura debe ser independiente del espeleo-buceador deportivo, al cual se deberá respetar por su conocimiento, experiencia y buen hacer, pero siempre sin otorgarle tareas que solo se pueden llevar a cabo desde el conocimiento arqueológico. Por esta razón, el arqueólogo subacuático, experto en cavidades sumergidas, podrá contar con la ayuda del espeleo-buceador, pero éste último nunca podrá sustituirlo sino tan solo complementarlo.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

Abdelaziz, M. y Elsayed, M. (2019) «Underwater Photogrammetry Digital Surface Model (DSM) of the Submerged Site of the Ancient Lighthouse near Gaitbay Fort in Alexandria, Egypt», *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W10), pp. 1-8. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-1-2019.

Acevedo, A. y Franco, N. (2012) «Aplicación de DStrech-ImageJ a imágenes digitales del arte rupestre de Patagonia (Argentina).», *Comechingonia. Revista de Arqueología.*, pp. 152-175.

Acosta, G. y Jiménez, G. (2013) *La fotogrametría digital mediante dron como alternativa en el registro topográfico y 3D de sitios arqueológicos*, Instituto de Investigaciones Antropológicas.

Admetlla, E. (1957) *La llamada de las profundidades*. Editorial Juventud,S.A.

Aguilar, J., Granado, G. y Barrera, J. A. (2015) «Aplicación de técnicas avanzadas para el registro y la documentación estratigráfica en arqueología», *Virtual Archaeology Review*, 4(8), p. 130. doi: 10.4995/var.2013.4345.

Alcover, J. A., Font, A. y Trias, M. (1997) «Primera troballa de fauna vertebrada pliocènica a Cabrera», *Endins: publicació d'espeleologia*, (21), pp. 79-82.

Alcover, J. A. y Ramis, D. (2004) *Myotragus: d'ovella a cabra a causa del clima i la insularitat*, Universitat de les Illes Balears. Disponible en: [https://tic.uib.cat/digitalAssets/127/127586\\_46\\_myotragus.pdf](https://tic.uib.cat/digitalAssets/127/127586_46_myotragus.pdf).

Amblàs, D. (2012) *Morfodinàmica sedimentària de marges continentals passius silicoclàstics*. Universitat de Barcelona.

Amegual, M. G. y Cabrer, M. Á. (2005) «Recull toponímic en el municipi de Manacor», en *Manacor: espai, fet urbà i societat: III Jornades d'Estudis Locals de Manacor: 21 i 22 de maig de 2004*. Ajuntament de Manacor, pp. 393-408.

De Anda, G. (2003) «Los cenotes y su reconocimiento, una aportación metodológica». Undergraduate thesis. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida.

De Anda, G., Ortega, K. y Brady, J. E. (2019) «Chichén Itzá and the Gran Acuífero Maya», *Arqueología mexicana* Vol. 26, Nº. 156 (marzo-abril), 2019, pp. 34-41.

Andreu, J. M. *et al.* (2016) «Los manantiales kársticos», *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 24(1), pp. 74-87.

Andrews, A. P. y Corletta, R. (1995) «A Brief History of Underwater Archaeology in the Maya Area», *Ancient Mesoamerica*, 6, pp. 101-117. doi: 10.1017/S0956536100002121.

Andrews, E. W. (1960) «Excavations at Dzibilchaltun, Yucatan, Mexico», *Proceedings of the American Philosophical Society*, 104(3), pp. 254-265.

Anschuetz, K. F., Wilshusen, R. H. y Scheick, C. L. (2001) «An archaeology of landscapes: perspectives and directions», *Journal of archaeological research*, 9(2), pp. 157-211.

Antigüedad, I., Morales, T. y Uriarte, J. A. (2007) «Los acuíferos kársticos. Casos del País Vasco», *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15(3), pp. 325-332.

Antunes, M. T. y Cunha, A. S. (1992) «Neanderthalian remains from Figueira Brava cave, Portugal», *Geobios*, 25(5), pp. 681-692. doi: [https://doi.org/10.1016/0016-6995\(92\)80108-P](https://doi.org/10.1016/0016-6995(92)80108-P).

Aramburu-Zabala, J. (2018a) «Bibliografía Arqueológica de las Islas Baleares. Serie XII: Arqueología Submarina», pp. 1-17.

Aramburu-Zabala, J. (2018b) «Inventario arqueológico de Mallorca. Manacor». Disponible en: [https://www.academia.edu/36700718/INVENTARIO\\_ARQUEOLÓGICO\\_DE\\_MALLORCA\\_MANACOR](https://www.academia.edu/36700718/INVENTARIO_ARQUEOLÓGICO_DE_MALLORCA_MANACOR).

Arfib, B. *et al.* (2016) «Origin of flash flood water of a Mediterranean river in karstic and urban environments by CTD monitoring (Las - Toulon - SE France)», *Proceedings Eurokarst 2016*. Disponible en: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01458740>.

Arias, P. (2020) «Spain: Underwater exploration on a narrow continental shelf», *Coastal Research Library*, 35, pp. 281-294. doi: 10.1007/978-3-030-37367-2\_13.

Arroyo-Cabrales et al. (2015) «Underwater Archaeology and Prehistory: the Case of the Cenotes in Mexico», *WORLD HERITAGE HEADS* 5, p. 54.

Arroyo-Cabrales, J. et al. (2015) «Underwater Archaeology and Prehistory: the Case of the Cenotes in Mexico», *WORLD HERITAGE HEADS*, 5, pp. 54-60. doi: 10.13140/RG.2.2.33881.83048.

Artiaga, D., Gibert, L. y García-Veigas, J. (2015) «Microscopía electrónica de las mineralizaciones cársticas de óxidos de hierro y manganeso de Cueva Victoria (Cartagena, Murcia)», *Mastia. Revista del Museo Arqueológico Municipal de Cartagena. Geología y Paleontología de Cueva Victoria*, 11-12-13, pp. 75-84.

Avmami, G. (2003) «Les coves del Penedès: la seva descoberta i utilització per l'home al llarg del temps», *Del Penedès*, (7), p. 7.

Aymamí (2007) «El riu subterrani de la Falconera (Garraf). Notes sobre un projecte d'exploració de les aigües de finals del segle XIX», *Del Penedès*, (18), pp. 89-93.

Bagot, F. (1999) «El dibujo arqueológico», *El dibujo arqueológico*, pp. 75-95. doi: 10.4000/books.cemca.1004.

Bahn, P. y Renfrew, C. (2008) *Arqueología. Conceptos clave*. Ediciones AKAL.

Bailey, G. y Flemming, N. (2008) «Archaeology of the continental shelf: Marine resources, submerged landscapes and underwater archaeology», *Quaternary Science Reviews*. doi: 10.1016/j.quascirev.2008.08.012.

Bailey, G. N. (1984) «Los yacimientos, sus territorios de explotación y la topografía», *Boletín del Museo Arqueológico Nacional (Madrid)*, (January 1984), pp. 25-46.

Barba-Meinecke, H., Pizá Chavez, A. y Quetz León, G. (2022) «El Patrimonio Cultural Subacuático en la región de la Península de Yucatán , México Underwater Cultural Heritage in the Yucatán Peninsula Region , Mexico», *Revista Contacto*, 1, pp. 258-292.

Barba Meinecke, H. (2020) «Proyecto de salvamento arqueológico U Lu'umil Maaya Wiiniko'ob: Un análisis del sureste mesoamericano. Proyecto marco de salvamento arqueológico "Tren Maya" estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo.», *Informe de Actividades Arqueología Subacuática de*

la Coordinación Nacional de Arqueología. Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), p. 53.

Barceló, M. (2006) «Contra les Illes Orientals D ' Al-Andalus ( Aljaz ~ ¡" Ir Al-Sharqiyya Al-Andalus ) Abans De La Conquesta Catalana ( 1229 )», *Estudi General*, pp. 99-107.

Bass, G. (1966a) «Archaeology Under Water. Thames and Hudson», *London, UK*.

Bass, G. (1966b) *Archaeology under Water, Antiquity*. London: Cambridge University Press.

Bellés, X. (1987) *Fauna cavernícola i intersticial de la Península Ibèrica i les Illes Balears*. Editorial CSIC-CSIC Press.

Bellet, O. A. (1957) «Topografía de las cavidades de difícil exploración», *Revista de la Universidad de Oviedo*, pp. 167-173.

Bergadà, M. M. *et al.* (2018) «Procesos deposicionales y antrópicos en el registro holoceno de la cova de Can Sadurní (Begues, Barcelona, España): aportaciones microestratigráficas», *Boletín Geológico y Minero*, 129(1/2), pp. 251-284.

Bernabeu, J. y Molina Balaguer, L. (2011) «La Cova de les Cendres (Moraira-Teulada, Alicante)». Disponible en: <http://hdl.handle.net/10550/28890>.

Bernal, D. y Ribera, A. (2008) *Cerámicas hispanorromanas: un estado de la cuestión*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz.

Bernat i Roca, M. (2001) «Les coves on els moros estaven. Els darrers nuclis de resistència dels vençuts (1230-1242).», *Bolletí de la Societat Arqueològica Lul·liana*, 57, pp. 29-48.

Bicho, N. y Cardoso, L. (2010) «Paleolithic occupations and lithic assemblages from Furninha cave , Peniche ( Portugal ) Ocupaciones paleolíticas e industrias líticas de la Gruta Furninha , Peniche ( Portugal )», *Zephyrus*, LXVI, pp. 17-38.

Billaud, Y. (2009) «Archéologie, Spéléologie et Plongée: Gisements et Vestiges en Karst Noyé», *Spélunca Mémoires*, 34(1), pp. 193-202.

Billaud, Y. *et al.* (2014) «Acquisition 3D et documentation multiscalair de la grotte Cosquer: une réponse aux difficultés d'accès et à une submersion inéluctable?», *Karstologia*, (64), pp. 7-16.

Blanc, A. C. (1940) *Industrie musteriene e paleolitiche superiori nelle dune fossili e nelle grotte litoranee del Capo Palinuro*. G. Bardi.

Blasco, A. *et al.* (1981) «La cova de Can Sadurní, una cruïlla de camins», *Pyrenae: revista de prehistòria i antiguitat de la Mediterrània Occidental*, (17), pp. 11-34.

Blasco, A., Edo, M. y Villalba, M. J. (2011) «La cova de Can Sadurní i la prehistòria de Garraf. Recull de 30 anys d'investigació.», *Actes de les Jornades internacionals de Prehistòria 'El Garraf, 30 anys d'investigació arqueològica*.

Bonomo, M. F. *et al.* (2014) «An Exploratory Non-Destructive Provenance Analysis of Two Middle Archaic Greenstone Pendants from Little Salt Spring, Florida, USA», *Geoarchaeology*, 29(2), pp. 121-137. doi: 10.1002/gea.21470.

Bordes, F. (2000) *Typologie du Paléolithique ancien et moyen*. Ed. du CNRS.

Borrell *et al.* (2016) «La cova de Sant Llorenç (Sitges, Barcelona). Un Exemple d'ocupació en cova en el procés de neolitització del Garraf.», *Jornades d'Arqueologia del Penedès, 2011, 255454*, pp. 97-107.

Borrell, F. *et al.* (2014) «Les ocupacions de la cova de Sant Llorenç (Sitges, Garraf): noves aportacions al coneixement de la prehistòria del Garraf», *Tribuna d'Arqueologia*, 2011-2012, pp. 110-128.

Bosch, A., Chinchilla, J. y Tarrús, J. (2011) «El poblament lacustre del neolític antic de La Draga. Excavacions 2000-2008.», *Monografies del CASC*, 9.

Bover y Ramis (2005) «Requiem for *Myotragus balearicus* domestication», *Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 12, pp. 73-84.

Bowens, A. (2009) *Underwater Archaeology: The NAS Guide to Principles and Practice, Second Edition*, *Underwater Archaeology: The NAS Guide to Principles and Practice, Second Edition*. doi: 10.1002/9781444302875.

Brugal, J. P. *et al.* (2012) «The complex carnivore-rich assemblages from Furninha (Peniche, Portugal): a multidisciplinary approach», *Journal of Taphonomy*, 10(3-4), pp. 417-438.

BUEx (2002) *Comparativa de títols de buceo en cuevas*. Disponible en: [http://www.buex.org/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=](http://www.buex.org/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=)

105.

Burgess, R. F. (1999) *The cave divers*. Aqua Quest Publications, Inc.

Buzzacott, P. L. *et al.* (2009) «American cave diving fatalities 1969-2007», *International Journal of Aquatic Research and Education*, 3(2), p. 7. doi: 10.25035/ijare.03.02.07.

Calvo, M. (2009) «Reflexiones en torno a los esquemas de racionalidad espacial reflejados en el paisaje durante la Prehistoria de Mallorca», *Pyrenae*, 40, pp. 37-78. Disponible en: [www.arqueobaleaer.uib.es/depart/dha/prehistoria](http://www.arqueobaleaer.uib.es/depart/dha/prehistoria).

Calvo, M. *et al.* (2011) «The ways people move: mobility and seascapes in the Balearic Islands during the late Bronze Age (c. 1400–850/800 BC).», *World Archaeology*, 43(3), pp. 345-363.

Campbell, P. B. (2016) «The Archaeology of Underwater Caves», *Council for British Archaeology*, (April), p. 364.

Campbell, P. B. (2017) «An Introduction to Archaeology in Underwater Caves», en *The Archaeology in Underwater Caves*, pp. 5-25.

Campbell, P. B. (2018) «Future Directions in Underwater Cave Research», *The Archaeology of Underwater Caves-United Kingdom*, 287Y293, (July).

Carandini, A. (1997) «Historias en la tierra», *Manual de excavación arqueológica*.

Carbonell, E. *et al.* (1981) «La indústria en sílex del jaciment a l'aire lliure de la zona del Rafal des Porcs – cova des Drac (Santanyí, Mallorca)», *Endins*, 8, pp. 75-80.

Cardona, F. (1990) «Grans cavitats de Catalunya. El sistema mediterrani i la depressió central», *Club de Gràcia, Badalona*, pp. 443-446.

Carreras, C. (2016) «Pascual 1 (Área costera noreste tarraconense)», *Amphorae ex Hispania. Paisajes de producción y de consumo*.

Carreras, M. *et al.* (2018) «Sparus II AUV - A Hovering Vehicle for Seabed Inspection», *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 43(2), pp. 344-355. doi: 10.1109/JOE.2018.2792278.

Castelló, J. (2005) «La celebración del Natalis Urbis en Cales Coves (Menorca):

ritual y oficiantes», *Comunicació presentada a: Congrés Internacional d'Història de les Religions Homo Religiosus. Mediadores con lo divino en el mundo mediterráneo antiguo. Palma de Mallorca, Centre de Cultura Fundació "Sa Nostra". 13-15 octubre 2005.*

Castillo-Belinchón, R. (2006) «La Arqueología como ciencia de investigación histórica para la protección y difusión del Patrimonio Cultural Subacuático», *Museo Nacional de Arqueología Subacuática*, pp. 1-20.

Cerezo, F. (2016) *Los puertos antiguos de Cartagena: geoarqueología, arqueología portuaria y paisaje marítimo: un estudio desde la arqueología náutica*. Universidad de Murcia.

Chase, A. S. Z., Chase, D. Z. y Chase, A. F. (2017) «LiDAR for Archaeological Research and the Study of Historical Landscapes», pp. 89-100. doi: 10.1007/978-3-319-50518-3\_4.

Chatters, J. C. *et al.* (2014) «Late Pleistocene human skeleton and mtDNA link Paleoamericans and modern Native Americans», *science*, 344(6185), pp. 750-754.

Checa, A. *et al.* (1988) «Sistemas deltáicos holocenos de los ríos Llobregat, Besós y Foix: Modelos evolutivos transgresivos», *Acta geológica hispánica*, 23, pp. 241-255.

Clark, P. U. *et al.* (2009) «The Last Glacial Maximum», *Science*, 325(5941), pp. 710-714. doi: 10.1126/science.1172873.

Clausen, C. J., Brooks, H. K. y Wesolowsky, A. B. (1975) «The early man site at warm Mineral Springs, Florida», *Journal of Field Archaeology*, 2(3), pp. 191-213.

Clottes, J. *et al.* (1992) «La grotte Cosquer datée», *Bulletin de la Société préhistorique française*, 89(8), pp. 230-234. doi: 10.3406/bspf.1992.9527.

Coles, J. M. (2018) «A wetland perspective», en *Wet site archaeology*. CRC Press, pp. 1-14.

Coll, J. (2020) «Ànima de fang. La ceràmica popular del archipièlago balear, en Alfarería tradicional de España.», *Alfarería Insular. Illes Balears. Duodécimas Jornadas de alfarería*. Avilés, pp. 4-84.

Collina-Girard, J. (1995) «La grotte Cosquer et les sites paléolithiques du littoral

marseillais (entre Carry-le-Rouet et Cassis)», *Méditerranée*, 82(3), pp. 7-19. doi: 10.3406/medit.1995.2896.

Colom, E. y Járrega, R. (2018) «Un extraordinario e inédito caso de ánfora reparada. La Dressel 2-3 de la Font de ses Aiguades (Mallorca, Illes Balears)», *Boletín Ex Oicina Hispana 9* (abril 2018), pp. 19-21.

Colom, E. y Járrega, R. (2020) «Un excepcional conjunt d'àmfores laietanes trobades a la Font de Ses Aiguades (Alcúdia, Mallorca).», *Estudis sobre ceràmica i arqueologia de l'arquitectura. Homenatge al Dr. Alberto López Mullor. Barcelona.*, pp. 253-262.

Conte, G. *et al.* (2008) «Underwater archeology missions design for data gathering automation», *2008 Mediterranean Conference on Control and Automation - Conference Proceedings, MED'08*, pp. 1083-1088. doi: 10.1109/MED.2008.4602179.

Cousteau, J.-Y. y Dumas, F. (1965) *The silent world*. New York: Perennial Library, Harper Row Publishers. Disponible en: <http://113.160.249.209:8080/xmlui/handle/123456789/16487>.

Crespo, A. y San Claudio, M. (2020) «El yacimiento arqueológico Galeón Ribadeo I en Galicia: investigación histórico-arqueológica y propuestas de patrimonialización.», (*CCHS-IH*) *Informes y documentos de trabajo*. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/201926>.

Criado, F. (1999) *Del terreno al espacio: planteamientos y perspectivas para la arqueología del paisaje*. Editado por U. de S. de Compostela. *Cadernos de Arqueología e Patrimonio (CAPA)*. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10261/5698>.

Cuerda, J. (1966) «Sobre la edad de algunos yacimientos pleistocénicos de Baleares con *Myotragus*», *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 12(12), pp. 29-38.

Cunliffe, B. (1971) *Román bath discovered*. Routledge & Kegan Paul.

Custodio, E. *et al.* (1993) «Results from studies in several karst formations in southern Catalonia (Spain)», *Hydrogeological processes in karst terranes. Proc. international symposium & field seminar, Antalya, Turkey, 1990*, (207), pp. 295-

326.

Dandha, A. *et al.* (2019) «Recreating cultural heritage environments for VR using photogrammetry», *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(2/W9), pp. 305-310. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-305-2019.

Daura, J. *et al.* (2005) «A neandertal mandible from the cova del Gegant (Sitges, Barcelona, Spain)», *Journal of Human Evolution*, 49(1), pp. 56-70.

Daura, Joan *et al.* (2010) «La cova del Coll Verdaguer (Cervelló, Barcelona): un cubil de hiena y oso con presencia humana durante el Paleolítico Medio.», *Zona arqueológica*, 13, pp. 502-507.

Daura, J. *et al.* (2010) «Stratigraphic context and direct dating of the Neandertal mandible from cova del Gegant (Sitges, Barcelona)», *Journal of Human Evolution*, 59(1), pp. 109-122. doi: 10.1016/j.jhevol.2010.04.009.

Daura, J. *et al.* (2017) «Objetos de oro y epicampaniforme en la cova del Gegant. Relaciones en la costa mediterránea de la Península Ibérica durante la Edad del Bronce», *Trabajos de Prehistoria*, 74(1), p. 149. doi: 10.1016/j.ejso.2014.10.053.

Daura, J. *et al.* (2021) «A new chronological framework and site formation history for cova del Gegant (Barcelona): Implications for Neanderthal and Anatomically Modern Human occupation of NE Iberian Peninsula», *Quaternary Science Reviews*, 270, p. 107141. doi: 10.1016/J.QUASCIREV.2021.107141.

Daura, J. *et al.* (2022) «Neanderthal Fossils, Mobile Toolkit and a Hyena Den: The Archaeological Assemblage of Lateral Gallery 1 in cova Del Gegant (NE Iberian Peninsula)», *Quaternary*, p. 12. doi: 10.3390/quat5010012.

Daura, J. y Sanz, M. (2009) «Historiografia dels jaciments plistocens», *Treballs Museu Geologia Barcelona*, pp. 5-38. doi: 10.1038/146475b0.

Daura, J. y Sanz, M. (2012) «La cova de Can Sadurní i la prehistòria de Garraf. Ana Blasco, Manel Edo, Maria Josefa Villalba», *Materials del Baix Llobregat*, 18, pp. 89-91. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/Materials/article/view/263363>.

Daura, J. y Sanz, M. (2014) «La cova del Gegant (Sitges, Barcelona)», *Universidad de Burgos. Fundación Atapuerca.*, pp. 276-280.

Davila, F. y Camacho, E. (2012) «Georreferenciación de documentos cartográficos para la gestión de Archivos y Cartotecas. “Propuesta Metodológica”», en V IBERCARTO (ed.). Disponible en: <http://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/CTC-Ibercarto-V-Georreferenciacion.pdf>.

Delgado, J. P. (2000) «Underwater archaeology at the dawn of the 21st century», *Historical Archaeology*, 34(4), pp. 9-13.

Departamento de Cultura de las Islas Baleares (2011) *Decreto 14/2011, de 25 de febrero, por el cual se aprueba el Reglamento de intervenciones arqueológicas y paleontológicas de las Illes Balears, Boletín Oficial de las Islas Baleares*.

Devos et al. (2004) «Introduction to Guideline Procedures - Part 2 : Methods», *Global Underwater Explorers*.

Devos, F., Le Maillot, C. y Riordan, D. (2005) «Introduction to Guideline Procedures – Part 3 : Navigation», *DIRquest. Global Underwater Explorers*, pp. 33-35.

Deyà, J., Colom, E. y Gràcia, F. (2022) «La cova des Drac des Rafal des Porcs ( Santanyí , Mallorca ). Un tresor arqueològic recuperat de l’oblit», *Papers de la Societat Espeleològica Balear*, 5, pp. 127-143.

Díaz, J. J. et al. (2019) «Drones al servicio de la Arqueología. Generación de planimetrías de precisión en Baelo Claudia (Tarifa, Cádiz).», *Revista Técnica de Maquina y Obra pública*, 76, pp. 4-12.

Domindo, I., Burke, H. y Smith, C. (2007) «Manual de Campo del Arqueólogo. Barcelona», *Ariel*.

Domínguez, M., Fernández Matallana, F. y Casaban Banaclocha, J. L. (2013) «Métodos de documentación arqueológica aplicados en arqueología subacuática: el modelo fotogramétrico y el fotomosaico del pecio fenicio Mazarrón-2 (Puerto de Mazarrón, Murcia)», *SAGVNTVM. Papeles del Laboratorio de Arqueología de Valencia*, 44, pp. 99-109. doi: 10.7203/sagvntvm.44.1683.

Dourteau, M., Andreo, F. C. y Garrido, M. A. (2021) «Los SIG aplicados al estudio del paisaje cultural marítimo: Colonia del Sacramento desde el siglo XVII al XX.», *Papeles de Geografía*, (67).

Edeso-Fito, J. M. y Mujika-Alustiza, J. A. (2017) «Estudio de patrones espaciales y de reconstrucción paisajística mediante el uso de sistemas de información geográfica (Praileaitz I, Deba, Gipuzkoa)», *Munibe Monographs: Anthropology and Archaeology Series, (1)*. Editado por Munibe Monographs. Anthropology and Archaeology Series, pp. 171-191. Disponible en: <http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf>.

Edo, M. y Antolín, F. (2016) «Cova de Can Sadurní, la transformació d'un jaciment. L'episodi sepulcral del neolític postcardial», *Tribuna d'Arqueologia*, 2013, pp. 81-105.

Egocheaga, J. E. *et al.* (2004) «New Evidence and Interpretation of Subvertical Grooves in Neandertal Teeth From Cueva De Sidrón ( Spain ) and Figueira Brava ( Portugal )», *Anthropologie*, XLII(I), pp. 49-52.

Encinas, J. A. (1997) «El jaciment fòssilífer de la cova Estreta (Pollença, Mallorca)», *Endins: publicació d'espeleologia*, (21), pp. 83-92.

Encinas, J. A. (2014) «Corpus Cavernario Mayoricense», *Pollença: El Gall Editor*.

Espinosa, R. J. (2002) *Indicaciones y técnicas crenoterápicas de las aguas minero-medicinales*. Disponible en: [http://www.igme.es/actividadesigme/lineas/HidroyCA/publica/libros3\\_RHS/Libro108/LIBRO108.pdf](http://www.igme.es/actividadesigme/lineas/HidroyCA/publica/libros3_RHS/Libro108/LIBRO108.pdf).

Espitia, N. (2019) *Análisis de calidad de agua potable con relación a sus parámetros físicoquímicos , biológicos , y crecimiento de Lemna minor en la estancia de Lurín , Lima 2015-2016*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos Universidad del Perú. Decana de América.

Faura, M. (1907) «Recull espeleològic de Catalunya M . Faura y Sans To cite this version : HAL Id : halshs-00759443 t Recull Espeleològic».

Faura y Sans, M. (1907) *Recull espeleològic de Catalunya, Sota Terra*. Editado por Club Muntanyenc.

Fernández, C. (2003) «Las sales y su incidencia en la consevación de la cerámica arqueológica», *Monte Buciero*, (9), pp. 303-325.

Fernández, R. (2011) «Empleo del georadar y métodos eléctricos: sondeo

eléctrico vertical y perfilaje eléctrico simétrico en la detección de cavernas en partes del vial albaiza - sola», pp. 1-7.

Fernández, R. y Baquero, J. C. (2006) «Acuíferos Kársticos Costeros. Introducción a su conocimiento», pp. 60-97.

Fernández, W. (2008) «Calidad de datos en levantamientos topográficos», *Revista de Topografía AZIMUT*, 2(0), pp. 5-17.

Finlayson, C. *et al.* (2008) «Gorham's Cave, Gibraltar-The persistence of a Neanderthal population», *Quaternary International*, 181(1), pp. 64-71. doi: 10.1016/j.quaint.2007.11.016.

Finlayson *et al.* (2001) «The Underwater Archaeological and Historical Heritage of Gibraltar», *Almoraima*, 25, pp. 429-435.

Fiorani, L. *et al.* (2000) «GEOSCOPE and GEOLIDAR : Integrated Instruments for Underground Archaeological Investigations», *integrated instruments for underground archaeological investigations. Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 1(3), pp. 305-319.

Flemming, N. (1972) *Cities in the Sea*. New English Library.

Flemming, N. (2020) «Global experience in locating submerged prehistoric sites and their relevance to research on the american continental shelves», *Journal of Island and Coastal Archaeology*, 0(0), pp. 1-24. doi: 10.1080/15564894.2020.1781712.

Flemming, N. y Antonioli, F. (2016) «Prehistoric Archaeology, Palaeontology, and Climate Change Indicators from Caves Submerged by Change of Sea Level», en *The Archaeology of Underwater Caves*.

Flemming, N. y Antonioli, F. (2017) «The Archaeology of Underwater Caves», *University Press*, The Archae.

Flemming, N. C. *et al.* (2014) *Land Beneath the Waves Submerged landscapes and sea level change*, *European Marine Board*.

Foley, B. y Mindell, D. (2002) «Precision survey and archaeological methodology in deep water», *ENALIA: The Journal of the Hellenic Institute of Marine Archaeology*, VI, 6, pp. 49-56. Disponible en:

<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Precision+Survey+and+Archaeological+Methodology+in+Deep+Water#0>.

Ford, D. y Williams, P. (2013) *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. doi: 10.1002/9781118684986.

Foster, J. W. *et al.* (2019) «Let There Be Light in the Dark Zone : Insights into Taíno Cave Paintings in the Eastern Dominican Republic», en *The Archaeology of Underwater Caves*. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/337720575%0ALet>.

Freixes, A. *et al.* (2021) «La qualitat de l'aigua del sistema hidrogeològic del Garraf i les seves implicacions. Informe final.», *AMB Residus*, (Junio), pp. 1-23. Disponible en: [https://www.amb.cat/es/web/ecologia/gestio-i-organitzacio/estudis/estudis-ambientals/detall/-/estuditerritorial/olors-a-la-surgencia-de-la-falconera/11787959/11818?\\_EstudiTerritorialSearchListPortlet\\_WAR\\_AMBSearchPortletportlet\\_pageNum=1&\\_EstudiTerritoria](https://www.amb.cat/es/web/ecologia/gestio-i-organitzacio/estudis/estudis-ambientals/detall/-/estuditerritorial/olors-a-la-surgencia-de-la-falconera/11787959/11818?_EstudiTerritorialSearchListPortlet_WAR_AMBSearchPortletportlet_pageNum=1&_EstudiTerritoria).

Fumás, M. (2021) «El Proyecto IASCM (Investigación Arqueológica Subacuática en las Cuevas de Mallorca). Una investigación multidisciplinar aplicada al campo de la arqueología subacuática prospectiva en cavidades kársticas sumergidas», *Iberae num.6*, pp. 8-13.

Fumás, M. (2022a) «Métodos y técnicas de prospección topográfica aplicada a la arqueología en cavidades cársticas sumergidas con visibilidad cero. El Proyecto Falconera.», *Revista Atlántica-mediterránea.*, 24, pp. 61-86.

Fumás, M. (2022b) «Métodos y técnicas de prospección topográfica aplicada a la arqueología subacuática en cavidades sumergidas : el estudio arqueo métrico de la Cueva del Sistema Sa Gleda – Camp des Pou ( Manacor -Mallorca- ).», *SPAL*.

Fumás, M. J. *et al.* (2022) «Methods and techniques of photogrammetric and topographic geopositioning applied to the archaeological record of underwater sites in submerged caves . The Cave of the Font de Ses Aiguades ( Alcúdia , Mallorca )». doi: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4091212>.

Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial. (2016) *Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial Ajuntament de Manacor. Adaptació del catàleg dels centres d'interès*

*cultural de Manacor al PTM volum 13. Jaciments rqueològics (III).*

Gàmez, D. (2007) «Sequence Stratigraphy as a tool for water resources management in alluvial coastal aquifers: application to the Llobregat Delta (Barcelona, Spain)», *Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica*, PhD, p. 177. doi: 10.1029/2005WR004524.Abdulah.

García-Castrillo, G., Lanuza, P. y López, P. (2003) «El entorno marino de los restos arqueológicos», *Monte ...*, 9, pp. 96-108. Disponible en: [http://dialnet.unirioja.es/servlet/dfichero\\_articulo?codigo=759264](http://dialnet.unirioja.es/servlet/dfichero_articulo?codigo=759264).

García, D. (2014) *Análisis espacial de evidencia arqueológica sumergida: cenote Holtún de Chichén Itzá*. Universidad Autónoma de Yucatan.

García, M. A. *et al.* (2019) «El proyecto Delta, ejemplo de investigación y protección del patrimonio arqueológico subacuático de Andalucía», en *La recuperación del patrimonio arqueológico sumergido: problemas y propuestas: Phicaria, VII Encuentros Internacionales del Mediterráneo*. Universidad Popular de Mazarrón, pp. 17-33.

García, M. y Morel, P. (1995) «Restes et reliefs : présence de l'homme et de l'ours des cavernes dans la grotte de Montespan-Ganties, Haute-Garonne», *Actes du 5ème Colloque international de «Hasri»*, pp. 73-78.

García Rosselló, J., Calvo Trias, M. y Albero Santacreu, D. (2008) «III Jornades d ' Arqueologia de les Illes Balears», *III Jornades d ' Arqueologia de les Illes Balears*, pp. 65-73.

Gerovasileiou, V. *et al.* (2013) «Three-dimensional mapping of marine caves using a handheld echosounder», *Marine Ecology Progress Series*, 486, pp. 13-22. doi: 10.3354/meps10374.

Gi, P. y Rossell, I. (1963) «Una aproximación a la prehistoria de Mallorca», *Empúries: revista de món clàssic i antiguitat tardana*, (25), pp. 137-163.

Giaime, M. *et al.* (2017) «In search of Pollentia's southern harbour: Geoarchaeological evidence from the Bay of Alcúdia (Mallorca, Spain)», *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 466, pp. 184-201. doi: 10.1016/j.palaeo.2016.11.023.

Gijón-Yescas, N. *et al.* (2021) «Evaluación de productos fotogramétricos de una

unidad kárstica obtenidos con un dron», *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24(January), p. 22.

Gilli, E. (2021) «Survey of Deep Flooded Caves BT - Port Miou and Le Bestouan (Cassis, France): The Largest French Submarine Karst Springs», en Gilli, E. (ed.). Cham: Springer International Publishing, pp. 55-58. doi: 10.1007/978-3-030-50192-1\_8.

Ginés, A. *et al.* (2012) «An introduction to the quaternary of Mallorca», en *Monografies de la Societat d'Historia Natural de les Balears*, pp. 13-53.

Ginés, Á. (1993) «El conocimiento espeleo-topográfico de las cavidades baleares (1862-1992)», *Endins: publicació d'espeleologia*, (19), pp. 55-70-70.

Ginés, A. y Ginés, J. (2010) «La cova de sa Font (o cova des Moro) i l'origen del topònim de s'illa de sa Dragonera: una hipòtesi espeleològica», *Endins: publicació d'espeleologia*, (34), pp. 9-18.

Ginés, J. (2000) *El Karst litotal en el levante de Mallorca. Una aproximación al conocimiento de su morfología y cronología*. Universitat de les Illes Balears.

Goldscheider, N. (2005) «Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany», *Hydrogeology Journal*, 13(4), pp. 555-564. doi: 10.1007/s10040-003-0291-3.

Gómez-Muñoz, M. S. (2019) «La cartografía histórica como fuente para el estudio del paisaje cultural marítimo de la Bahía de Cádiz. Una propuesta analítica y metodológica», *Jangwa Pana*, 18(2), pp. 256-276. doi: 10.21676/16574923.2926.

Gómez, A. T. (2005) *Topografía subterránea*. Univ. Politèc. de Catalunya.

Gómez, J. A. (2006) «Vivac Subterráneos», *VIII Curso de Monitores Deportivos en Espeleología y Descenso de Cañones*, p. 35. Disponible en: <https://www.efiemer.com/wp-content/uploads/2019/02/vs.pdf>.

Gómez, S. (2018) «The Sacred Island of Venus Marina. an Ancient Sacred Reference for Navigation in the Bay of Cádiz», *Revista Atlántica-mediterránea*, 20(2018), pp. 1-227.

González, J. (2002) «Estudio historiográfico, catálogo e interpretación de las cuevas-refugio y cuevas-santuario de época ibérica en Alicante», *Recerques del*

*Museu d'Alcoi*, 12(11), pp. 57-84.

González, S. (2014) «La fotografía como objeto. Una reflexión sobre la relación entre representación visual y discurso arqueológico», en *José Latova. Cuarenta años de fotografía arqueológica española (1975-2014)*. Museo Arqu.

Gornes, J. (1996) «Arqueología de la muerte y cambio social: Análisis e interpretación de la necrópolis de Cales Coves, Menorca», *Complutum (Madrid)*, (7), pp. 91-103.

Govern de les Illes Balears (2017) *Plan de Gestió Natura 2000*.

Gràci, M. *et al.* (2006) «El sistema Pirata-Pont-Piqueta (Manacor, Mallorca): geomorfologia, espeleogènesi, hidrologia, sedimentologia i fauna», *Endins: publicació d'espeleologia*, pp. 25-64.

Gràcia, F. *et al.* (1998) «La cova des Drac de Cala Santanyí», *Endins: publicació d'espeleologia*, pp. 55-66.

Gràcia, F. *et al.* (2001) «Notícia Preliminar del Jaciment Arqueològic de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia, Mallorca)», *Endins: publicació d'espeleologia*, 24, pp. 59-74.

Gràcia, F. *et al.* (2003) «Les coves de Cala Anguila (Manacor, Mallorca). II: La cova genovesa o cova d'en Bessó. Espeleogènesi, geomorfologia, hidrologia, sedimentologia, fauna, paleontologia, arqueologia i conservació», *Endins: publicació d'espeleologia*, (25), pp. 43-86.

Gràcia, F. *et al.* (2005) «La cova des Coll (Felanitx, Mallorca). Espeleogènesi, geomorfologia, hidrologia, sedimentologia, fauna i conservació», *Endins: publicació d'espeleologia*, 27, pp. 141-186.

Gràcia, F. *et al.* (2007) «La cova de sa Gleda. I. Sector clàssic, sector de ponent i sector cinc-cents (Manacor, Mallorca): Geomorfologia, espeleogènesi, sedimentologia i hidrologia», *Endins: publicació d'espeleologia*, 31, pp. 43-96.

Gràcia, F. *et al.* (2010) «El sistema de cavitats Gleda - Camp des Pou (Manacor, Mallorca)», *Endins: publicació d'espeleologia*, (34), pp. 35-68.

Gràcia, F. *et al.* (2011) «Cavitats Subaquàtiques de la franja litoral de Mallorca», *Endins: publicació d'espeleologia*, 35, pp. 103-132.

Gràcia, F. *et al.* (2014) «Es Dolç (Colònia de Sant Jordi, ses Salines, Mallorca). Cavitats litorals amb influències hipogèniques», *Endins: publicació d'espeleologia*, 36, pp. 69-96.

Gràcia, F. (2015) *Les cavitats Subaquàtiques de les Zones Costaneres del Llevant i Migjorn de Mallorca, TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. Universitat de les Illes Balears. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10803/382836>.

Gràcia, F. *et al.* (2020) «Sistema Gleda-Camp des Pou (Manacor, Mallorca): estat de la qüestió», *Papers Societat Espeleològica Balear*, 3, pp. 1-32.

Gràcia, F. *et al.* (2022) «La cova des Drac des Rafal des Porcs: exploracions i descobriments de 1997 ( Santanyí, Mallorca )», *Papers de la Societat Espeleològica Balear*, 5, pp. 109-126.

Gratacós, O. (2004) *Modelización 3D de transporte y sedimentación clástica subacuática*. Universitat de Barcelona. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/267921129\\_SIMSAFADIM-CLASTIC\\_Modelizacion\\_3D\\_de\\_transporte\\_y\\_sedimentacion\\_clastica\\_subacuatica](https://www.researchgate.net/publication/267921129_SIMSAFADIM-CLASTIC_Modelizacion_3D_de_transporte_y_sedimentacion_clastica_subacuatica).

Green, J. y Gainsford, M. (2003) «Evaluation of underwater surveying techniques», *International Journal of Nautical Archaeology*. doi: 10.1016/j.ijna.2003.08.007.

Green, J. L. (2016) «Chronoclinical Variation and Sexual Dimorphism in *Mammot americanum* ( American mastodon ) from the Pleistocene of Florida», (January 2006).

Gregory, D. y Manders, M. (2015) *Guideline Manual 2*. doi: 10.13140/RG.2.2.24861.92644.

Grosso, M. *et al.* (2019) «Aportes para una caracterización de los ambientes intermareales y su aplicación en el estudio del registro arqueológico en el litoral marítimo argentino Resumen Introducción», 28(1), pp. 17-35.

Guerrero, V. (1985) *Indigenisme i colonització púnica a Mallorca*. Ajuntament de Ses Salines.

Guerrero, V. (1996) «El poblamiento inicial de la isla de Mallorca», *Complutum*, 6(6), pp. 83-104. doi: 10.5209/CMPL.30998.

- Guía ENC (2019) «SEACRAFT guide», *Marina Tech S.A.*
- Gusó, M. T. (1995) «Arqueologia de les cavernes de Mallorca», *Endins: publicació d'espeleologia*, 20, pp. 171-190.
- Gutherz, X. y Coste, A. (1974) «Les vases de la Grotte de l'Avencas (Brissac, Hérault) et le Néolithique récent dans le Midi de la France», *Bulletin de la Société préhistorique française. Études et travaux*, 71(2), pp. 535-542. doi: 10.3406/bspf.1974.8283.
- Al Hamdani, Z. *et al.* (2012) *Guideline Manual 1. Guidelines to the process of underwater archaeological research.*
- Hanwell, J. D., Price, D. y Witcombe, R. (2010) *Wookey Hole: 75 Years of Cave Diving & Exploration.* Cave Diving Group.
- Hermández, J. (2009) «Les coves de la Cinglera del Castell de Santueri (Felanitx, Mallorca): Els materials del fons colominas del Museu d'Arqueologia de Catalunya», *Endins*, 33. Disponible en: [http://ibdigital.uib.es/greenstone/collect/endins/archives/Endins\\_2/009v33p0/19.dir/Endins\\_2009v33p019.pdf](http://ibdigital.uib.es/greenstone/collect/endins/archives/Endins_2/009v33p0/19.dir/Endins_2009v33p019.pdf).
- Hoffmann, D. L. *et al.* (2018) «Symbolic use of marine shells and mineral pigments by Iberian Neandertals 115.000 years ago», *Science Advances*, 4(2). doi: 10.1126/sciadv.aar5255.
- Huber, F. (2009) «Investigaciones arqueológicas subacuáticas en cenotes y sistemas de cuevas inundadas de Yucatán: un proyecto de cooperación germano-mexicano - campaña 2009», pp. 22-28.
- Huber, F. (2014) «Tauchgang in die Totenwelt: Prospektions- und Dokumentationsmethoden Tauchgang in die Totenwelt», (March), pp. 366-393.
- Hwang, Y. *et al.* (2016) «Correction for light scattering combined with sub-pixel classification improves estimation of gap fraction from digital cover photography», *Agricultural and Forest Meteorology*, 222, pp. 32-44.
- Igual, J. (2019) «El ruido en fotografía digital: sensores y exposición», *Colección Académica.*
- Illiffe, T. M. y Bowen, C. (2001) «Scientific cave diving», *Marine Technology*

*Society Journal*, 35(2), pp. 36-41. doi: 10.4031/002533201788001901.

Izaguirre, M. (2010) «El Registro Gráfico Subacuático: La Topografía Manual». Monografies del CASC 8.

Izquierdo, P. (2014) «Arqueología de Sitges; Actes de la Primera Jornada», en *Jornada d'Arqueologia de Sitges*. Consorci del Patrimoni de Sitges.

Járrega, R. y Colom, E. (2019) «El comerç del vi laietà procedent del Maresme cap a Itàlia en època romana», *Laietania*, (20), pp. 147-157.

Jasinski, M. (1965) *Plongées sous la terre*. FeniXX.

de Juan, C. *et al.* (2017) «Els Derelictes Bou Ferrer i Illes Formigues II , dos jaciments extraordinaris per comprendre el comerç naval de la Bètica al període Julioclaudi», *Tribuna d'Arqueologia*, (19), pp. 254-272.

De Juan, C. (2009) «La prospeccion arqueologica subacuática. Principios y métodos.», *Arqueologia nàutica mediterrània*, pp. 121-132.

Juan, J. (2005) «La celebración del Natalis Urbis en Cales Coves (Menorca): ritual y oficiantes», *Comunicació presentada a: Congrés Internacional d'Història de les Religions Homo Religiosus. Mediadors con lo divino en el mundo mediterráneo antiguo. Palma de Mallorca, Centre de Cultura Fundació "Sa Nostra". 13-15 octubre 2005*.

Kantor, G. *et al.* (2008) «Experiments in Navigation and Mapping with a Hovering AUV. In Field and Service Robotics», *Springer*, 42, pp. 115-124. doi: 10.1007/978-3-540-75404-6\_11.

Kempf, M. (2020) «Modeling multivariate landscape affordances and functional ecosystem connectivity in landscape archeology», *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12(8), pp. 1-21.

Kincaid, T. (2000) «Mapping and Modeling the Morphology of Underwater Caves in the Taurus Mountains and Antalya Travertine Plateau , Southern Turkey», *Underwater Science and Technology Meeting, Middle East Technical University, Ankara Turkey*.

Kinkella, A. (2000) *Preliminary Archaeological Investigations at the late classic Maya site of Cara Blanca, Belize*. California State University, Northridge.

- Kister, S. (2017) «MNEMO User guide v1.6», pp. 1-42.
- Knapp, A. B. y Ashmore, W. (1999) «Archaeological landscapes: constructed, conceptualized, ideational», *Archaeologies of landscape: contemporary perspectives*, pp. 1-30.
- Lasaponara, R. *et al.* (2014) «Investigating archaeological looting using satellite images and GEORADAR: The experience in Lambayeque in North Peru», *Journal of Archaeological Science*, 42(1), pp. 216-230. doi: 10.1016/j.jas.2013.10.032.
- Leandro, J. y Díez de la Rubia, E. (2017) «Radiolocalización y Comunicación en Cavidades Subterráneas. Proyecto baliza sumergible “SUMMER” y receptor “WINTER”», *Grupo espeleológico del centro excursionista de Alicante. Asociación Extopocien*, pp. 1-17.
- Leandro Ronda, J. *et al.* (2021) «Georreferenciación mediante radiobalizas en Cueva del Agua, Cartagena (España)», *Grupo Cueva del Agua LIMITE5000*, pp. 1-8.
- Leica-Geosystems (2020a) «Estación total Leica TS16».
- Leica-Geosystems (2020b) «Leica Viva GS16 Especificaciones Técnicas».
- León, C. (2003) «Metodología de la arqueología subacuática», *Monte buciéro*, 9, pp. 109-125.
- Lichter, M. *et al.* (2010) «Biodata of Sea level changes of Mediterranean past and present», *Springer Science*, pp. 3-17. doi: 10.1007/978-90-481-8569-6.
- Louys, J. (2018) «Practice and prospects in underwater palaeontology», *Palaeontologia Electronica*, 21(21.2).
- Lucero, L. J. (2015) «Results of the 2014 Valley of Peace Archaeology Project: Underwater and Surface Explorations at Cara Blanca», pp. 1-151. Disponible en: [http://faculty.las.illinois.edu/ljlucero/documents/VOPA\\_2014\\_Report.pdf](http://faculty.las.illinois.edu/ljlucero/documents/VOPA_2014_Report.pdf).
- Lull, V. *et al.* (1999) «La cova des Mussol, un lugar de culto en la Menorca prehistórica», *Consell Insular de Menorca, uSa Nostra» Obra Social y Cultural Oiseño*, pp. 1-68.
- Maarleveld, T., Guérin, U. y Egger, B. (2001) *Manual para actividades dirigidas*

*al Patrimonio Cultural Subacuático: directrices para el Anexo de la Convención de la UNESCO de 2001*. UNESCO.

Mantyla, A. (1986) «Standard Seawater Comparisons Updated», *Journal of Physical Oceanography*, 148, pp. 148-162.

Marchi, G. (1852) *La stipe tributata alle divinità delle Acque apollinari scoperta al cominciare del 1852*. Tipografia delle Belle Arti.

Marín, F. y Sanjuan, B. (2018) «Reflexiones en torno al expolio arqueológico: sensibilización y medios de comunicación», en *El expoliar se va a acabar: uso de detectores de metales y arqueología: sanciones administrativas y penales*. Tirant lo Blanch, pp. 439-466.

Marlasca, R. y López, J. (2014) «Aprovisionamiento de agua y culto en la prehistoria pitiusa», *Treballs del Museu Arqueològic d'Eivissa i Formentera*, pp. 397-411.

Martin-Bueno, M. y Sáenz, J. C. (2017) *Topografía aplicada a la arqueología*, *Prensas de la Universidad de Zaragoza*.

Martín, A. M. y Cobo, G. E. (2006) «Los inicios de la arqueología subacuática en España (1947-1948)», *Mayurqa*, pp. 359-396. doi: 10.1007/978-3-540-30133-2\_124.

Martínez-Espejo, I. (2014) *Precisiones sobre el levantamiento 3D integrado con herramientas avanzadas, aplicado al conocimiento y la conservación del patrimonio arquitectónico*, *Repositorio Institucional*. Universitat Politècnica de València Escuela. doi: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/37512>.

Martínez, Q. (2010) «Aplicación D-Stretch del software Image-J. Avance de resultados en el Arte Rupestre de la Región de Murcia», *Cuadernos de Arte Rupestre*, 5, pp. 9-27. Disponible en: [http://www.museosdemurcia.com/rupestre/cuadernos/images/6/QuesadaCAR2008\\_6\\_2.pdf](http://www.museosdemurcia.com/rupestre/cuadernos/images/6/QuesadaCAR2008_6_2.pdf).

Martins, A. *et al.* (2018) «UXNEXMIN AUV Perception System Design and Characterization», *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*, pp. 1-7. doi: 10.1109/AUV.2018.8729829.

Martos, L. (2018) «Las Aguas Sagradas. Arqueología de los Cenotes de Yucatán

(México). Parte 2».

Mayoral, J. (2017) «Comparativa entre el modelo tradicional de documentación arqueológica y la fotogrametría subacuática: un acercamiento práctico de los pecios Deltebre I y Cala Cativa I», p. 141.

Meliá, C. V. (1982) *La necrópolis protohistórica de Cales Coves, Menorca*. Editorial CSIC-CSIC Press.

Ministerio de Cultura (2009) *Libro Verde del Plan Nacional de Protección del Patrimonio Cultural Subacuático Español, Secretaría General Técnica. Subdirección General de Publicaciones, Información y Documentación*. España.

Ministerio de Educación (2015) *Plan Nacional de Protección del Patrimonio Arqueológico Subacuático*. España.

Ministerio de Fomento (1997) «Normas De Seguridad Para El Ejercicio De Actividades Subacuáticas», *BOE-A-280 del 22 de noviembre de 1997*, 4(182), p. 10.

Ministerio de Transportes (2013) *Tablas de buceo con aire*. Disponible en: [https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/paginabasica/recursos/1\\_tablas\\_buceo\\_con\\_aire.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/1_tablas_buceo_con_aire.pdf).

Ministerio de Transportes (2020) *Bolentín General del Estado Núm.177 Sec.I*.

Molina De Dios, R. (1995) «Líneas férreas industriales de las Baleares», *150 años de Ferrocarril en España. I Congreso de Historia Ferroviaria*, pp. 1-18.

Montes, R. (1991) «La cueva de los Aviones. Un Yacimiento del Paleolítico Medio (Cartagena, España).», *Memorias de Arqueología de la Región de Murcia*, 2, pp. 35-38.

Mora, M. Á. (2017) «EJE 07-16 Consideraciones metodológicas para la elaboración de una prospección arqueológica utilizando herramientas SIG», *Memorias y Boletines de la Universidad del Azuay*, (XVI), pp. 467-471.

Morales, F. J. (2000) «Prospección y Excavación: Principios Metodológicos Básicos», *El patrimonio arqueológico de Ciudad Real: métodos de trabajo y actuaciones recientes*, pp. 355-368.

Morales, J. (2015) «La Guardia Civil y la lucha contra el expolio arqueológico»,

*Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada*, 25, pp. 31-48. doi: 10.30827/cpag.v25i0.5392.

Moreno, A. y Quixal, D. (2013) «Bordes, Bases e informes: El dibujo arqueológico de material cerámico y la fotografía digital», *Arqueoweb. Revista sobre Arqueología en internet*, 14, pp. 178-214.

Moreno, J. A. (2007) «Bioestratigrafía del Aptiense del macizo del Garraf ( NE de la Península Ibérica )», *GEOGACETA*, 41, pp. 131-134.

Moya, J. y Muñoz, F. J. (2017) «Fotogrametría de restos arqueológicos subacuáticos. El Modelo del Pecio Bou Ferrer», en *Actas de las II Jornadas de Museos y Colecciones Museográficas Permanentes de la Comunidad Valenciana. Nuevas tecnologías aplicadas a la gestión turística del patrimonio arqueológico*.

Moyes, H. (2012) «“Introduction”. In Sacred Darkness: A Global Perspective on the Ritual Use of Caves», en *Sacred Darkness*. University Press of Colorado, pp. 1-12. doi: 10.1145/601858.601867.

Moyes, H. y Brady, J. (2012) «Caves as Sacred Space in Mesoamerica», en *Sacred Darkness*, pp. 151-171.

Moyes, H. y Montgomery, S. (2016) «Mapping Ritual Landscapes Using Lidar», *Advances in Archaeological Practice*, 4(3), pp. 249-267. doi: 10.7183/2326-3768.4.3.249.

De Mulder, G. (2020) «Los primeros años arqueológicos de William Waldren», en VIII Jornades d'Arqueologia de les Illes Balears (ed.), pp. 423-430.

Munar, S. y Sastre, M. A. (2010) «El portus de Pollentia. Resultats preliminars de la intervenció arqueològica al solar del carrer Corall, cantonada amb carrer Maristany (Port d'Alcúdia)», *VI Jornades d'Estudis Locals d'Alcúdia*, pp. 31-46.

Negri, S. y Leucci, G. (2006) «Geophysical investigation of the temple of Apollo (Hierapolis, Turkey)», *Journal of archaeological science*, 33(11), pp. 1505-1513.

Newsom, L. A. y Purdy, B. A. (1990) «Florida canoes: a maritime heritage from the past», *The Florida Anthropologist*, 43(3), pp. 164-180.

Nieto, F. J. (1984) «Introducción a la arqueología subacuática», *Cymys*, 2.

Nieto, X. (2009) «Principios Metodológicos de una excavación arqueológica

subacuática», *Arqueologia nàutica mediterrània*, pp. 183-188.

Nieto, X. y Santos, M. (2010) «El barco griego arcaico de Cala Sant Vicenç», *Publications de l'Institut Français d'Études Anatoliennes*, 20(1), pp. 45-58.

Nocerino, E. *et al.* (2019) «3D Virtualization of an underground semi-submerged cave system», en *27th CIPA International Symposium "Documenting the past for a better future"*. Avila, Spain, pp. 12-19. doi: <http://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-857-2019>.

Ogloblin, I., Galili, E. y Shahack-Gross, R. (2021) «Locating submerged prehistoric settlements: A new underwater survey method using water-jet coring and micro-geoarchaeological techniques», *Journal of Archaeological Science*, 135(July), p. 105480. doi: 10.1016/j.jas.2021.105480.

Pachas, R. (2009) «El levantamiento topográfico: Uso del GPS y estación total», *Academia*, 8(16), pp. 29-45. Disponible en: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/30397/1/articulo3.pdf>.

Pais, J. *et al.* (2000) «The Neogene of Algarve (Portugal)», *Ciências da Terra/Earth Sciences Journal*, 14.

Pais, J. y Legoinha, P. (2000) «Gruta da Figueira Brava (Arrábida): geological setting», *Memórias Da Academia Das Ciências de Lisboa. Tomo XXXVIII*.

Palombo, M. R. *et al.* (2006) «The Plio-Pleistocene endemic bovids from the Western Mediterranean islands: knowledge, problems and perspectives», *Hellenic Journal of Geosciences*, 41(1), pp. 153-162.

Palomo, A. *et al.* (2014) «Prehistoric occupation of Banyoles lakeshore: results of recent excavations at La Draga site, Girona, Spain», *Journal of Wetland Archaeology*, 14(1), pp. 58-73.

Pereda, R. y Sánchez, J. (2013) «Metodologías topográficas clásicas», *Universidad de Cantabria*, pp. 1-41. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2494/course/section/2568/metologiasClasicas.pdf>.

Pérez-Juez, A., Goldberg, P. y Cabanes, D. (2011) «Estudio interdisciplinar del hábitat post-talayótico: bioarqueología, geoarqueología y registro arqueológico para la revisión metodológica de la arqueología en Menorca», *Economia*

*agropecuària i canvi social a partir de les restes bioarqueològiques. El primer mil·lenni a.C. a la Mediterrània occidental. Actes de la V Reunió Internacional d'Arqueologia de Calafell (Calafell, 16 al 18 d'abril de 2009)*, 12/2011, pp. 139-149.

Pérez de Andrés, C. (2003) «La conservación del material arqueológico subacuático. El arqueólogo y el restaurador ante las primeras intervenciones», *Monte Bouceiro*, 9, pp. 84-93.

Petit y Rovira, J. (1980) «El jaciment arqueològic de la cova Verda i alguns problemes del Neolític i l'edat de Bronze a Catalunya», *Quaderns de treball*, pp. 1-81.

Petriaggi, B. D. y De Ayala, G. G. (2015) «Laser Scanner reliefs of selected archeological structures in the submerged Baiae (Naples)», *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(5W5), pp. 79-83. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-79-2015.

Picornell, L. (2012) «Paisaje vegetal y comunidades prehistóricas y protohistóricas en Mallorca y Menorca (Illes Balears): una aproximación desde la antracología», p. 386.

«Pla de Gestió Natura 2000 Coves» (2000).

Pons, M. O., Baratta, G. y Mayer, M. (2013) «El santuario de Calescoves (Alaior, Menorca): la cova dels Jurats o Església», en *V jornades d'Arqueologia de les Illes Balears: Palma, 28 a 30 de setembre, 2012*. Documenta Balear, pp. 109-118.

Potts, L., Buzzacott, P. y Denoble, P. (2016) «Thirty years of American cave diving fatalities», *Diving Hyperbaric Medicine*, 46, pp. 150-154.

Prummel, W. y Frisch, H. J. (1986) «A guide for the distinction of species, sex and body side in bones of sheep and goat», *Journal of Archaeological Science*, 13(6), pp. 567-577. doi: 10.1016/0305-4403(86)90041-5.

Quam, R. *et al.* (2015) «The Neandertals of northeastern Iberia: New remains from the cova del Gegant (Sitges, Barcelona)», *Journal of Human Evolution*, 81, pp. 13-28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2015.02.002>.

Le Quellec, J. L. *et al.* (2013) «DStretch® et l'amélioration des images

numériques: applications à l'archéologie des images rupestres», *Les cahiers de l'AARS*, 16(June 2014), pp. 177-198. doi: 10.1016/j.daach.2015.01.003.

Quirós, E. (2014) *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Universida.

Rabineau, M. *et al.* (2006) «Paleo sea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500,000 yr)», *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1-2), pp. 119-137.

Ramis, D. *et al.* (2002) «The Chronology of the First Settlement of the Balearic Islands», *Journal of Mediterranean Archaeology*, 15(1), pp. 3-24. doi: 10.1558/jmea.v15i1.3.

Ramis, D. y Santandreu, G. (2011) «Arqueologia de les cavernes de les Illes Balears», *Monografies de la Societat d'Historia Natural de les Balears*, 17(August), pp. 317-332.

Ramos, J. (2015) «Avance al estudio del arte rupestre de la Cueva del Humo en La Araña (Málaga)», *Revista Atlántica-Mediterránea de Prehistoria y Arqueología Social*, 17, pp. 41-51.

Ramos, J., Aguilera, R. y España, M. B. (2001) «Materiales arqueológicos de la Cueva del Humo (La Araña, Málaga)», *Anuario Arqueológico de Andalucía [1998]: Sumario, Actividades Sistemáticas, Actividades de Urgencia, Consejería de Cultura*, pp. 540-549.

Rana, H. S. y Navy, L. P. (2008) *Comparison of XBT vs CTD Data*.

Raposo, L. y Cardoso, J. L. (2000) «Mousterian industries of the Gruta da Figueira Brava», *Mémoires da Academia das Ciências de Lisboa*, pp. 319-337.

Raurich i Santaló, X. (1994) «Jaciment de Cala Cativa: notes sobre el primer treball d'arqueologia subaquàtica realitzat a Catalunya», *Annals de l'Institut d'Estudis Empordanesos*, 27(0), pp. 261-271. Disponible en: <http://biblioteca.mmb.cat/lib/item?id=chamo:3053&theme=MMB>.

Reece, R. (1989) *The Temple of Sulis Minerva at Bath. Vol. II. The Finds from the Sacred Spring*. 2011/04/21, *The Antiquaries Journal*. 2011/04/21. Cambridge University Press. doi: DOI: 10.1017/S0003581500085723.

Renfrew, C. y Bahn, P. (1993) «Arqueología: Teorías, métodos y práctica (Vol. I)», *Madrid: Ediciones Akal. Recuperado el*, 21.

Richmond, K. *et al.* (2020) «Autonomous exploration and 3-D mapping of underwater caves with the human-portable SUNFISH® AUV», en *Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast*. IEEE, pp. 1-10. doi: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389069.

Rissolo, D. *et al.* (2015) «Novel application of 3D documentation techniques at a submerged Late Pleistocene cave site in Quintana Roo, Mexico», *2015 Digital Heritage*, pp. 181-182. doi: 10.1109/DigitalHeritage.2015.7413868.

Rocha, C. R. *et al.* (2014) «Paleoenvironmental investigations, chemical analysis and characterization of underwater strata of Marigondon Cave», *Quaternary International*, 431, pp. 223-231. doi: 10.1016/j.quaint.2014.04.005.

Rodríguez Alcalde, Á. L. (1995) «Aproximación estadística al paisaje humano en la prehistoria de Mallorca», *Complutum*, (6), pp. 167-192. doi: 10.5209/CMPL.31076.

Rodríguez, L. *et al.* (2011) «A Neanderthal Lower Incisor from cova del Gegant (Sitges, Barcelona, Spain)», *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Sección geológica*, 105(1-4), pp. 25-30.

Ros, A. (1997) *Fundamentos básicos del buceo en cuevas y grutas*. Editado por C. E. de Cartagena. Colección Manuales para el buceo técnico.

Royal, W. y Clark, E. (1960) «Natural Preservation of Human Brain, Warm Mineral Springs, Florida», *American Antiquity*, 26(2), pp. 285-287.

Rubio, J. M. V. (2014) «El clima de la Tierra a lo largo de la Historia», *Clima, naturaleza y desastre: España e Hispanoamérica durante la Edad Moderna*, pp. 118-151. Disponible en: <http://analesranf.com/index.php/mono>.

Ruiz, R. (2013) *El régimen jurídico del patrimonio cultural subacuático Aspectos de derecho interno y de derecho internacional, público y privado*. Disponible en: [www.bibliotecavirtualdefensa.es](http://www.bibliotecavirtualdefensa.es).

La Russa, M. F. *et al.* (2013) «A multidisciplinary approach to the study of underwater artefacts: The case of a Tritone Barbato marble statue (Grotta Azzurra, Island of Capri, Naples)», *Periodico di Mineralogia*, 82(1), pp. 101-111. doi:

10.2451/2013PM0006.

Sáez, L. (2016) «La difusión del Patrimonio Cultural Subacuático en el siglo XXI mediante dos casos prácticos , el pecio Bou Ferrer y el proyecto Mazarrón», en *Actas de las IX Jornadas de Jóvenes en Investigación Arqueológica. Santander*, pp. 551-557.

Sahuquillo, A. (2002) «Desarrollos científicos y nuevas tendencias en hidrogeología», en *Presente y Futuro de las Aguas Subterráneas en la Provincia de Jaén*, pp. 1-11.

Sampietro, M. (2018) «Aplicación de los drones en diversos contextos arqueológicos y en casos de reconstrucción geoarqueológica», *COMECHINGONIA. Revista de Arqueología*, 22, pp. 271-294.

San Nicolás, M. y Martínez, C. (1987) «Prospecciones arqueológicas en la cueva C-6 Cabo Cope, Aguilas», *Excavaciones y prospecciones arqueológicas. Servicio Regional de Patrimonio Histórico, Murcia*, pp. 10-16.

Sánchez, M. M. O. (2013) «Ignacio Rodríguez Temiño, Indiana Jones sin futuro. La lucha contra el expolio del patrimonio arqueológico.», *SPAL-Revista de Prehistoria y Arqueología*, (22), pp. 227-229.

Sanchidrián, J. L. (2017) «La prospección arqueológica de las cuevas con arte paleolítico. Una propuesta metodológica», (16), pp. 27-40.

Sanz, M., Daura, J. y Subirà, E. (2005) «La mandíbula de neandertal de la cova del Gegant de Sitges.», *Quaderns de Patrimoni del Garraf*, 3, pp. 29-31.

Sauer, E. (2005) «Secrets of a sacred spring: Bourbonne-les-Bains», *Current World Archaeology*, (13).

Sauer, E. W. (2011) «Religious rituals at springs in the late antique and early medieval world», en *The Archaeology of Late Antique 'Paganism'*. Brill, pp. 503-550.

Seguí, B. *et al.* (1998) «El jaciment fòssilífer de la cova C-2 (Ciutadella de Menorca)», *Endins: publicació d'espeleologia*, 2(22), pp. 81-98.

Selmo, D. *et al.* (2017) «Underwater reflectance transformation imaging: a technology for in situ underwater cultural heritage object-level recording»,

*Journal of Electronic Imaging*, 26(1), p. 011029. doi: 10.1117/1.JEI.26.1.011029.

Silva, L. F. (2022) «Estudio de modelos para la recuperación de color en fotografías subacuáticas», en *Monografía Universidad Districtal Francisco José de Caldas*, pp. 1-63.

Simon, S. (2006) «Cova dels Musclos», *Mapes de Patrimoni Cultural. Diputació de Barcelona*, pp. 1-4.

Smith, K. (2013) «The Pinger - a Simple Underwater Radiolocation System», *Cave Radio & Electronic Group*, 84, pp. 3-8.

Smith, K. (2018) «The Pinger: operating instructions.», *Pinger Manual*, (June).

Smith, K. (2019) «Tank Cave Mapping revisited», *Cave Divers Association of Australia*. doi: Print Post No. PP 100023987.

Stringer, C. B. *et al.* (2008) «Neanderthal exploitation of marine mammals in Gibraltar», *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(38), pp. 14319-14324. doi: 10.1073/pnas.0805474105.

Sümen, S. y Aktas, S. (2019) «Health Problems in Cave Diving», en *Marine Caves of the Eastern Mediterranean Sea Biodiversity, Threats and Conservation*. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV), pp. 207-230.

Szukalski, B. W. y Glasspool, A. F. (2007) «The Bermuda cave and karst information system: a GIS decision-support tool for cave and karst management and conservation», en *Proceedings of the 18th National Cave & Karst Management Symposium*, pp. 8-12.

Technical Diving International (TDI) (1994) *TDI Standards and Procedures Manual v.0123*. Disponible en: <https://www.tdisdi.com/?lang=es>.

Torres, D. y Delgado, E. (2009) «Estrategia para mejorar la difusión de los resultados de investigación con la Web 2.0», *Profesional de la Informacion*, 18(5), pp. 534-539. doi: 10.3145/epi.2009.sep.07.

Trias, M. (1972) «Una campanya a les illes de Cabrera», *Endins: publicació d'espeleologia*, pp. 33-53.

Trias, M. (1981) «Noticia preliminar dels jaciments islàmics de la cova dels Amagatalls», *Endins: publicació d'espeleologia*, pp. 59-74.

Trias, M. (2000) «La cova des Moro (Manacor, Mallorca). Alguns destacats aspectes de la seva morfologia», *Endins: publicació d'espeleologia*, (23), pp. 73-78.

Vacchi, M. *et al.* (2018) «New relative sea-level insights into the isostatic history of the Western Mediterranean», *Quaternary Science Reviews*, 201, pp. 396-408. doi: 10.1016/j.quascirev.2018.10.025.

Valdivieso, G. E. (2022) «Parámetros espeleométricos para levantamientos espeleológicos de cavidades colombianas», *Mundo Subterráneo*, 8(December), pp. 2-20.

Valladas, H. *et al.* (2001) «Evolution of prehistoric cave art», *Nature*, 413(6855), p. 479. doi: 10.1038/35097160.

Vallicrosa, G. *et al.* (2020) «Sparus II AUV as a Sensor Suite for Underwater Archaeology: Falconera Cave Experiments», *2020 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Symposium, AUV 2020*, pp. 0-1. doi: 10.1109/AUV50043.2020.9267935.

Vann, R. D., Pollock, N. W. y Denoble, P. J. (2012) *Rebreather Forum 3, Rebreather Forum 3 Proceedings*.

Vasseur, F. (2006) *Topographier en plongée souterraine*. Disponible en: <https://new.plongeesout.com/choix.htm>.

Velandia, J. (2020) *Lo que nos cuenta la arqueología: Estudio de los procesos de divulgación y difusión del conocimiento científico para los proyectos de investigación arqueológica académica y preventiva en Colombia entre 2002 a 2018*. Universidad Externado de Colombia.

Vera, J. A. (1994) *Estratigrafía. Principios y métodos*. Editado por Editorial Rueda.

Veress, M. (2020) «Karst Types and Their Karstification», *Journal of Earth Science*, 31(3), pp. 621-634. doi: 10.1007/s12583-020-1306-x.

Vicente, O. (2005) *La aplicación de las nuevas tecnologías de visión computacional en el registro y la modelización de yacimientos arqueológicos*. Universitat Autònoma de Barcelona. Disponible en: [http://www.academia.edu/1538802/La\\_aplicacion\\_de\\_las\\_nuevas\\_tecnologias\\_de](http://www.academia.edu/1538802/La_aplicacion_de_las_nuevas_tecnologias_de)

\_vision\_computacional\_en\_el\_registro\_y\_la\_modelizacion\_de\_yacimientos\_arqueologicos.

Vilà, A. (2004) «Localizaciones Prehistóricas Garraf», *Revista de Girona*, (225), pp. 55-61.

Viñas, R. y Villalta, J. (1975) «El depósito cuaternario de la “cova del Gegant”», en *Speleon V Symposium de Espeleología*, pp. 19-33.

Vivar, G., Geli, R. y Nieto, X. (2013) «Deltebre I . Un barco hundido en la desembocadura del Ebro durante la Guerra del Francés», en *I Congreso de Arqueología Náutica y Subacuática Española*, pp. 221-233.

Waechter, J. y Flemming, N. (1963) «Underwater Caves of Gibraltar», *British Sub-Aqua Club*, (May).

Walker, M. (1987) «Los restos humanos de la cueva C-6 de Cabo Cope (Aguilas).» Departament of Antrophologi University of Sidney, pp. 24-25.

Waltham, T. (2002) «The engineering classification of karst with respect to the role and influence of caves», *International Journal of Speleology*, 31(1/4), pp. 19-35. doi: 10.5038/1827-806x.31.1.2.

Wambold, T. *et al.* (2006) «Three-Dimensional Cavern Imaging System», *University of Pennsylvania*, pp. 1-18. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8e419b7772dc76f1921021b26c1cba303690be22>.

Warmenbol, E. (2004) «Gold pickings and PIXE analysis. More about the Bronze age gold found in the cave of Han-sur-Lesse (Namur, Belgium)», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 226(1-2), pp. 208-221. doi: 10.1016/j.nimb.2004.05.019.

Warmenbol, E. (2014) «Le " Trou de Han " à Han-sur-Lesse , in Chr . Frébutte ( dir .)», en *Coup d'oeil Sur 25 Ans de Recherches Archéologiques À Rochefort, de 1989 À 2014*, pp. 68-79.

Weidner, N. *et al.* (2016) «Underwater Cave Mapping using Stereo Vision», en *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5709-5715.

Woelfl, S. (2017) «Uso de la Fotografía subacuática georreferenciada a través de buceo autónomo, como herramienta para estimar abundancia y distribución espacial de *Diplodon chilensis* (Gray, 1828) en el Lago Tinquilco del sur de Chile.» Universidad Austral de Chile.

Yamafune, K. (2016) «Efficient and Effective in situ Heritage Management : Using 3D photogrammetric models to document and assess a site ' s condition Kotaro Yamafune», (March). doi: 10.13140/RG.2.1.4529.8324.

Zilhão, J. (1997) *O Paleolítico superior da Estremadura portuguesa, Edições Colibri. Faculdade de Letras de Lisboa.* Colibri Lisbon. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/288004304\\_O\\_Paleolitico\\_Superior\\_da\\_Estremadura\\_portuguesa\\_volume\\_II](https://www.researchgate.net/publication/288004304_O_Paleolitico_Superior_da_Estremadura_portuguesa_volume_II).

Zilhão, J. *et al.* (2020) «Last Interglacial Iberian Neandertals as fisher-hunter-gatherers», *Science*, 367(6485), p. eaaz7943.

## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.** Adaptación de una imagen de un corte transversal de la montaña que alberga la cueva Cosquer en Marsella (Francia) con las tres zonas de usos diferenciado por Moyes. Fuente; (Moyes y Brady, 2012).

**Figura 2.** Imagen donde aparece la topografía y los restos arqueológicos encontrados en la Cueva C-6 ubicada en Cabo Cope (Murcia). Fuente; EspeleoAguilas.

**Figura 3.** Imágenes de la cueva de los Aviones; (A) El sitio visto desde un rompeolas en el puerto de Cartagena. (B) Vista general de la cueva. Remanente del Pleistoceno brechado antes (C) y después (D) de su excavación de 1985. Los círculos punteados en (C) y (D) indican la posición de la colada fechada, claramente sobre el depósito excavado. Fuente; (Hoffmann *et al.*, 2018).

**Figura 4.** Fotografía del Mar de Governor's Beach, en el lado sureste de la Roca, que muestra la cueva de Vanguard y la cueva de y Gorham. Fuente; (Stringer *et al.*, 2008).

**Figura 5.** Complejo cárstico de la Cueva del Humo en La Araña (Málaga). Fuente; (Ramos, 2015).

**Figura 6.** Entrada a la cueva cárstica litoral de Furninha, en la península de Peniche (Portugal). Fuente; <https://www.allaboutportugal.pt/pt/peniche/recursos-naturais/gruta-da-furninha>.

**Figura 7.** Vista de la entrada de la cueva Figueira Brava en Arrabida (Portugal). Foto; Joao Zilhão. Fuente; <https://www.bbc.com/news/science-environment-52054653>.

**Figura 8.** Afloramientos carbonatados en Europa. Fuente; (Fernández y Baquero, 2006).

**Figura 9.** Modelo conceptual del carst. Fuente; (Fernández Valderrama, 2004).

**Figura 10.** Esquema de las diferentes morfologías cársticas subacuáticas. Fuente (Campbell, 2017).

**Figura 11.** Reconstrucción paleogeográfica del mar Catalano-balear y las cuencas fluviales que drenaban durante el último máximo glacial (21.000 años BP). En la imagen se observa el ensanchamiento de la planicie costera (en verde) y la posición de la línea de costa hipotética (línea continua) consecuencia del bajo nivel del mar en el último máximo glacial. Además, en la presente reconstrucción se contemplan las posiciones de los cursos bajos y las desembocaduras de las cuencas antecesoras de algunos ríos actuales. La línea negra discontinua indica la posición de la línea de costa actual. Fuente; (Amblàs, 2012).

**Figura 12.** Reconstrucción de la línea de costa durante la transgresión versiliana con relación a los niveles de estabilización marina. Última transgresión marina registrada en el Mediterráneo desde la última glaciación hace 21.000 años BP hasta la estabilización de hace unos 5.000 a BP. Fuente; (Checa *et al.*, 1988).

**Figura 13.** Representación gráfica de un polígono topográfico de triangulación estructurado a base de grandes triángulos básicos. Fuente; (Izaguirre, 2010).

**Figura 14.** Representación del eje cartesiano con las proyecciones “y”. Fuente; (Izaguirre, 2010).

**Figura 15.** Representación de la cuadrícula rígida en la cuyos lados se representan los ejes “x” e “y” sobre los que se registran las proyecciones correspondientes. Fuente; (Izaguirre, 2010).

**Figura 16.** Método de topografía clásica manual mediante medición de segmentos a través del cálculo radial en estaciones. Fuente; Adaptación (Vasseur, 2006).

**Figura 17.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal primaria. **1.** Esquema de la prospección lineal primaria. **2.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal secundaria. **3.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal terciaria. **4.** Esquema básico de la técnica empleada en la prospección visual lineal pendular. (Autor; Antonio J. Talavera).

**Figura 18.** Ejemplos de la utilización de los dispositivos PINGER y SUMMER. **1.** Miembro de los GEAS extrayendo el dispositivo PINGER en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou en la campaña del año 2019 del Proyecto IASCM (Foto. Florian Huber). **2.** Receptor cilíndrico y auriculares del dispositivo

de radiolocalización PINGER utilizados durante la campaña de prospección arqueológica del Proyecto IASCM 20219. (Foto. Autor) **3.** Emisor de radiolocalización SUMMER colocado en una galería sumergida de la cueva de los Chorros, Riopar (Albacete). (Foto. Juan Leandro). **4.** Colocación del emisor SUMMER en la cavidad sumergida de la cueva Genovesa durante la campaña de prospección arqueológica del Proyecto IASCM 2020. (Foto. John Kendall).

**Figura 19.** Diferentes partes del emisor y receptor de radiolocalización; **1.** Imagen de los diferentes módulos de la baliza de radiolocalización SUMMER utilizado en la presente investigación. SUMMER. Fuente; (Leandro y Díez de la Rubia, 2017). **2.** Imagen detallada de cada uno de los componentes que forman parte del receptor WINTER creado por Juan Leandro. Fuente; (Leandro y Díez de la Rubia, 2017). **3.** Imagen del receptor WINTER durante la recepción de la señal del emisor SUMMER en la cova del Sistema Sa Gleda-Camps des Pou en Mallorca durante la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM (Foto. Autor). **4.** Detalle del dispositivo móvil ubicado en la consola de control del dispositivo receptor WINTER. Fuente; (Leandro y Díez de la Rubia, 2017).

**Figura 20.** Distintos ejemplos de topografía interna. **1.** Dispositivo de mapeo por hilo MNEMO utilizado por Javier Lario en la cueva del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Foto. John Kendall). **2.** Imagen de la consola GPS ENC2 de SEACRAFT montada sobre un escúter de aluminio. Fuente; (Guía ENC, 2019). **3.** Dispositivo ENC2 de SEACRAFT señalizando el punto donde se encuentran restos de cerámica sumergida en la cova del Sistema Sa Gleda-Camps des Pou. Campaña 2019 del Proyecto IASCM (Foto. Miguel Á. Perelló). **4.** Imagen del ecosonda Hondex PS-7 utilizada en las mediciones radiales en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. (Foto. Autor).

**Figura 21.** Equipos y ejemplos de metodología de registro utilizados. **1.** El AUV SPARUS II en las instalaciones del Centro de Investigación de Robótica Submarina (CIRS) de la Universidad de Girona. (Foto. Autor). **2.** Equipo fotográfico de última generación para la captura de imágenes en la cueva de Ses Aiguades (Proyecto IASCM 2020). (Foto. Autor). **3.** Imagen de la captura fotográfica de los restos óseos del *Myotragus balearicus* en la cueva de Ses Aiguades (Proyecto IASCM 2019) (Foto; Florian Huber). **4.** Escala con

orientación al Norte junto a las piezas cerámicas a fotografiar en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou (Proyecto IASCM 2020). (Foto; John Kendall).

**Figura 22.** Ejemplo de las distintas fases del procesado fotogramétrico de un ánfora con el software Agisoft Metashape Professional. Fuente; (Moya y Muñoz, 2017).

**Figura 23.** Dispositivo CTD propiedad del Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) utilizado en la cova de la Font de Ses Aiguades durante la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM. (Foto. Autor).

**Figura 24.** Áreas territoriales de estudio; 1. Mapa de la península ibérica donde se muestran las dos zonas de intervención de las cuevas prospectadas en los diferentes proyectos (A y B). Fuente; Google Earth. 2. Zona A, perteneciente a la costa del Garraf. Fuente; Google Earth. 3. Zona B, perteneciente a la isla de Mallorca, concretamente a la zona oriental de la isla. Fuente; Google Earth.

**Figura 25.** Localización de las cuevas en el litoral del Garraf. Fuente; Google Earth.

**Figura 26.** Topografía de la cova de la Xarxa. Autor; M. Romero y J.M. Cervelló. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

**Figura 27.** Imágenes de la cueva semisumergida de la Xarxa. 1. Vista de la entrada exterior de la cueva. 2. Vista de la entrada interior de la cueva. (Fotos; Josep María Cervelló). Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

**Figura 28.** Topografía de la cova del Congre. Autor; J. Ferreres y J. de Valles. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

**Figura 29.** Imágenes de la cueva semisumergida del Congre; 1. Entrada semisumergida de la cueva. 2. Acceso terrestre a la cueva. 3. Espeleo-buceador entrando en la parte sumergida de la entrada de la cueva. 4. Espeleo-buceador sumergiéndose en la galería inundada en la entrada de la cueva. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

**Figura 30.** Imagen donde se aprecia al geólogo Josep María Cervelló inspeccionando la parte superior de la cova del Congre, completamente seca, situada en la costa del Garraf. (Foto; Autor).

**Figura 31.** Topografía manual escalada realizada por el geólogo Josep María Cervelló y dibujada por Toni Inglés. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

**Figura 32.** Imágenes de la cova del Pebre. **1.** Vista de la entrada exterior. **2.** Vista de la entrada interior de la cova del Pebre. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>.

**Figura 33.** Topografía de la cova del Gegant realizada en 1972. Fuente; (Viñas y Villalta, 1975; Daura y Sanz, 2014).

**Figura 34.** Imagen del acceso a las cuevas de la Punta de les Coves antes de la construcción de los puertos deportivos. Fuente; Centre Excursionista Barcelonés, 1928 (Archivo Histórico de Sitges).

**Figura 35.** Plano cartográfico con la ubicación de las principales cuevas situadas en el Macizo del Garraf (Barcelona). Fuente; Adaptación de la Carta arqueológica subacuática de Sitges 2017 (Fumás, 2022a).

**Figura 36.** Imagen donde se aprecia la ubicación del Puerto Náutico del Garraf y la montaña de la Falconera. Fuente; Google Earth.

**Figura 37.** Imágenes de la historia de la Falconera. **1.** Puerto antiguo del Garraf con la montaña de la Falconera al fondo. Fuente; Club Nautic Garraf<sup>121</sup>. **2.** Pou de l'Eusebi, punto de extracción de agua de la surgencia de la Falconera. Fuente; (Jordi Perera. Imágenes de la cueva semisumergida de la Xarxa. (Fotos; Josep María Cervelló). Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>. **3.** Imagen de Eusebi Güell i Gaudí. Fuente; Fundación Antoni Gaudí.

**Figura 38.** Primeras topografías de la Falconera; **1.** Primera topografía de la cova de la Falconera realizada por E.Admetlla en 1954 donde aparece la sección del río subterráneo del Garraf en su salida al mar. Fuente; <https://www.espeleoindex.com/>. **2.** Topografía de la cova de la Falconera realizada por el equipo de Garraf 70 de FEDAS. Fuente; Archivo FEDAS. **3.** Croquis esquemático de la cova de la Falconera realizado por el equipo de X.Garza y J.L. Camus del Espeleo Club de Gràcia (ECG) en 1989. Fuente; Joan Perona (Cardona, 1990). **4.** Croquis esquemático de la cova de la Falconera,

---

<sup>121</sup> <https://www.clubnauticgarraf.com/es/default/club/content/ini/1/id/historia-ca>

donde se defiende la hipótesis de la cavidad como punto de aguada. (Autor; Antonio J. Talavera). Fuente; (Fumás, 2022a).

**Figura 39.** Imágenes de las primeras exploraciones en la cova de la Falconera y contaminación del agua; **1.** Primeros espeleo-buceadores en las cuevas del Garraf en el año 1960, F. Villate, A. Carreras, R. Lario, J. Bruguer, (Foto: Ramon Canela, G.E.B). **2.** Campaña de trabajo topográfico de 1989 Fuente; Archivo Espeleo Club de Gràcia (ECG). **3.** Salida de agua dulce contaminada por la boca de la cova de la Falconera. (Foto; Josep María Cervelló). **4.** Vertido al mar de miles de toneladas de aguas contaminadas procedentes de los niveles freáticos a través de la surgencia de la Falconera. (Foto; Josep María Cervelló).

**Figura 40.** Topografía más actual de la cova de la Falconera realizada por el equipo de espeleo buceadores del Espeleo Club Muntanyenc Barcelonés (ECMB).

**Figura 41.** Mapa de las cuevas cercanas donde se han encontrado restos arqueológicos alrededor de la cova de la Falconera. (Autor. Pablo Fraile).

**Figura 42.** Mapa de situación de las cavidades. Se aprecia la concentración de cuevas en el levante y mediodía de Mallorca, especialmente dentro de los materiales del Mioceno Superior post orogénico. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2011).

**Figura 43.** Perfil topográfico de la cova des Dolç. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2014).

**Figura 44.** Planta y sección del depósito arqueológico realizado en 1997 por Francesc Gràcia y Bernat Clamor, con la ubicación de las piezas cerámicas recuperadas. Fuente; (Deyà, Colom y Gràcia, 2022).

**Figura 45.** Imagen de la topografía de la cova des Coll sobre ortofotomapa (Felanitx, Mallorca). Fuente; (Gràcia *et al.*, 2005)

**Figura 46.** Cova de Pont-Piqueta donde aparece el puente de acceso a la cueva el cual podría datarse cronológicamente su construcción en el siglo XVII, si aceptamos como coetáneo los materiales cerámicos encontrados en la entrada de la cavidad. Fuente; (Gràci *et al.*, 2006; Gràcia, 2015).

**Figura 47.** Topografía de la cova des Drac de Cala Santanyí. Fuente: (Gràcia *et al.*, 1998).

**Figura 48.** Ubicación geográfica y perfil de entrada de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2010).

**Figura 49.** Topografía actual de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2020).

**Figura 50.** Topografía de la cova Genovesa o d'en Bessó sobre ortofotomapa. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003).

**Figura 51.** Topografía de la cova Genovesa realizada entre los años 2000 y 2002 por Francesc Gràcia, Bernat Clamor y Miguel Ángel Gual de la SEB. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003).

**Figura 52.** Muro sumergido debajo del agua en la entrada de la cova Genovesa. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003).

**Figura 53.** Mapa geográfico con la ubicación de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; Adaptación (Colom y Járrega, 2020).

**Figura 54.** Topografía de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2001).

**Figura 55.** Ánforas extraídas de la cavidad a finales de los años 90. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2001).

**Figura 56.** Imagen desde la zona inferior donde se aprecia la gran acumulación de rocas pigmentadas de forma natural. (Foto. Autor).

**Figura 57.** Imágenes de la cova del Gegant y alrededores; **1.** Imagen de la entrada al vestibulo de la cova del Gegant donde el equipo de arqueólogos del SERP trabaja en la parte terrestre. (Foto; Autor). **2.** Imagen de la playa al lado de la antigua discoteca Atlántida situada en el denominado Cap de Grills. Sitges. (Foto; Autor). **3.** Cova del Gegant. Año 2015. (Foto; Joan Daura). **4.** Cova del Gegant. Año 2017. (Foto; Autor).

**Figura 58.** Topografía terrestre de la cova del Gegant donde se aprecia la cuadrícula verde indica el área de trabajo submarina. Fuente; Adaptación (J. Daura *et al.*, 2010).

**Figura 59.** Imágenes de los trabajos de prospección llevados a cabo en la cova del Gegant; **1.** Imagen de la piqueta núm. 9 triangulada desde la entrada de la cueva. (Foto; Autor). **2.** Junta de la cuadrícula rota por las olas. (Foto; Autor). **3.** Colocación de la cuadrícula submarina. (Foto; Autor). **4.** Extracción manual de guijarros con una cesta. (Foto; Autor). **5.** Introducción del tubo en el estrato arenoso al tratar de realizar un sondeo estratigráfico. (Foto; Autor). **6.** Detalle de la plataforma de percusión del tubo metálico. (Foto; Autor).

**Figura 60.** Medición por eje cartesiano desde el punto B con la ubicación de los intentos negativos de extracción de sondeos estratigráficos. Fuente; elaboración propia.

**Figura 61.** Imágenes del Proyecto Falconera; **1.** Vista general del macizo del Garraf y entrada a la cova de la Falconera. (Foto; Florian Huber). **2.** Entrada por mar a la cavidad de la Falconera. (Foto; Florian Huber). **3.** Equipo del CIRS ubicando el SPARUS II en el agua. (Foto; Florian Huber). **4.** Espeleo-buceador guiando al SPARUS II dentro de la cavidad. (Foto; Florian Huber).

**Figura 62.** Datos obtenidos mediante el uso del SPARUS y el MNEMO; **1.** Primera toma de datos del SPARUS II con registro de profundidad en diferentes colores. Fuente;(Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a). **2.** Línea del mapeo por hilo realizada por el dispositivo MNEMO realizado por el software ARIANE sobre ortofotomapa. Fuente; (Fumás, 2022a). **3.** Solapamiento de la nube de puntos obtenida por el SPARUS II y la línea del MNEMO en perfil del área prospectada. Fuente; (Fumás, 2022a). **4.** Mapa escalado de los de puntos obtenidos en X, Y y Z de la Galería Jaume Ferran. Fuente; (Vallicrosa *et al.*, 2020; Fumás, 2022a).

**Figura 63.** Estudios topográficos en la cova de la Falconera; **1.** Esquema ejemplo del estudio de las poligonales terrestres para la obtención del punto 1 de entrada a la Falconera. (Autor; Pablo Cantuel). **2.** Hoja milimétrica y escalada del perfil de la costa del Garraf y cálculo de las distancias de la poligonal para la obtención de la coordenada punto 1. (Autores; Josep María Cervelló y Toni Inglés). **3.** Solapamiento del dibujo escalado de la costa del Garraf con los puntos obtenidos sobre ortofotomapa. (Autores; Josep María Cervelló y Toni Inglés). Fuente; (Fumás, 2022a).

**Figura 64.** Trabajos de prospección subacuática en la cova de la Falconera; **1.** Espeleo buceador utilizando el dispositivo MNEMO en el interior de la cova de la Falconera. (Foto; Florian Huber). **2.** Espeleo buceador midiendo con una varilla metálica el grosor del sedimento arenoso depositado en la Galería Jaume Ferran. (Foto; Florian Huber). **3.** Espeleo buceador realizando un core estratigráfico mediante la introducción por percusión de un tubo de PVC en el sustrato de sedimento arenoso. (Foto; Florian Huber). **4.** Muestra de la homogeneidad del core estratigráfico con la aparición del sustrato arenoso en el interior del tubo de PVC. (Foto; Florian Huber). Fuente; (Fumás, 2022a).

**Figura 65.** Mapa escalado con solapamiento sobre ortofotomapa de la topografía del ECMB, la línea de MNEMO y la nube de puntos obtenida por el SPARUS II (Autor; Pablo Fraile). Fuente; (Fumás, 2022a).

**Figura 66.** Topografía de la cavidad con el detalle del área de trabajo prospectivo (cuadro amarillo). Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 1998).

**Figura 67.** Detalle, sobre la topografía de la cavidad de la cuadrícula general, de la zona prospectada con los puntos de control y la ubicación de las piezas cerámicas más importantes. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 1998).

**Figura 68.** Imagen en detalle de la diferente estratigrafía obtenida por el core extraído en el punto 4. (Foto; Autor).

**Figura 69.** Imágenes de la prospección realizada en la cavidad de Drac de Cala Santanyí; **1.** Imagen de la zona de entrada al lago sumergido en la cova des Drac de Cala Santanyí (punto 2). (Foto; Autor). **2.** Francesc Gràcia introduce una piqueta de aluminio en el sedimento para medir la potencia de éste. (Foto; Autor). **3.** El flexómetro y la brújula indican específicamente la ubicación del área de prospección en la pendiente sumergida. (Foto; Autor). **4.** Fragmentos cerámicos de diferentes tipologías de muy difícil atribución cronológica. (Foto; Autor) **5.** Posible rueda de molino enterrada entre grandes bloques de piedra en medio de la pendiente de derrumbe. (Foto; Autor).

**Figura 70.** Imagen del equipo de intervención subacuática en la campaña de prospección del año 2019. (Foto; Florian Huber).

**Figura 71.** Campaña de prospección del año 2020. **1.** Equipo técnico necesario para las intervenciones subacuáticas. (Foto; Autor). **2.** Los espeleo-buceadores Francesc Gràcia y John Kendall durante la parte más compleja de la inmersión para colocar el emisor de radiolocalización. (Foto; Autor).

**Figura 72.** Diferentes trabajos terrestres y subacuáticos en la campaña de prospección del año 2020; **1.** El espeleo-buceador John Kendall sostiene el prisma reflectante ubicado en el punto a medir, en este caso un punto sumergido desde donde parten las líneas guía sumergidas. (Foto; Autor). **2.** El topógrafo Pablo Cantuel con ayuda de una estación total mide las distancias y ángulos en la entrada de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. (Foto; Autor). **3.** Dispositivo emisor de radiolocalización SUMMER en la parte sumergida de la Sala de los Moros con una pequeña inclinación. (Foto; John Kendall). **4.** Miembro del equipo de los GEAS colocando el radiolocalizador PINGER en el techo de la Sala de los Moros. (Foto; Florian Huber). **5.** El técnico electrónico Juan Leandro utilizando el receptor portátil ULC-1 tratando de localizar la ubicación del SUMMER en la Sala de los Moros. (Foto; Autor). **6.** Tras ubicar sobre el terreno el triángulo de error de la recepción de la baliza emisora el equipo en superficie procedió a tomar las coordenadas con GPS diferencial. (Foto; Autor). Fuente; (Fumás, 2022b).

**Figura 73.** Imagen del software ARIANE donde aparece el punto topográfico (estrella amarilla) a 22.26 m del punto 59 del MNEMO. (Foto; Autor).

**Figura 74.** Imagen del software ARIANE donde aparece el punto topográfico (estrella amarilla) a 41.12 metros del punto final del MNEMO (línea negra) en la Galería de las Cónicas. Fuente; elaboración propia.

**Figura 75.** Ortofotomapa donde se visualizan las líneas de lectura de hilo erróneas obtenidas con el MNEMO (línea azul) en la campaña de prospección y documentación del año 2019. (Autor; Pablo Fraile).

**Figura 76.** Ortofotomapa realizado con SIG con el solapamiento de la planta de la cavidad donde aparece la línea de lectura correcta del MNEMO (en verde) junto al PINGER. (Autor; Pablo Fraile).

**Figura 77.** Ortofotomapa con la superposición de la planta de la cueva y con el track desde la entrada sumergida hasta el Pas d'en Judes tomado con el dispositivo ENC2 en la campaña 2019. (Autor; Pablo Fraile).

**Figura 78.** Líneas de MNEMO desde la Sala de Entrada hasta la Sala de las Cónicas superpuesta sobre ortofotomapa, reflejado en el software ARIANE. Fuente; elaboración propia.

**Figura 79.** Línea del ENC2 (color azul) completamente coincidente con las líneas de MNEMO (color negro) excepto en el Pas d'en Judes. Fuente; elaboración propia.

**Figura 80.** Imagen del software del ARIANE donde se aprecia el error de 6.50 metros desde el punto final de lectura del ENC2 y el punto 59 del MNEMO. Fuente; elaboración propia.

**Figura 81.** Ortofotomapa con el solapamiento de la topografía donde se aprecian las lecturas de los distintos dispositivos utilizados (PINGER, MNEMO y ENC2 de SEACRAFT). (Autor; Pablo Fraile).

**Figura 82.** Vista de la cámara aérea confinada denominada Sala de los Moros. (Foto; Florian Huber).

**Figura 82.** Vista de la cámara aérea confinada denominada Sala de los Moros. (Foto; Florian Huber).

**Figura 84.** Primer boceto de la topografía realizada con la ubicación de las diferentes piezas arqueológicas y paleontológicas encontradas. (Autor; Marc Pintor).

**Figura 85.** Plano realizado en Autocad donde se muestra la topografía de la Sala de los Moros y los restos arqueológicos remanentes geo posicionados a través del conocimiento de la coordenada del punto 22 del MNEMO coincidente con la coordenada del PINGER. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 86.** Plano escalado de alzado y perfil de la Sala de los Moros en la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 87.** Plano topográfico realizado con Autocad donde se aprecian los cálculos preliminares en la obtención de la coordenada de inicio del MNEMO denominado punto 5000, la topografía de la Sala de los Moros y las diferentes líneas de medición de la poligonal de ida y vuelta del MNEMO y del ENC2 de SEACRAFT. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 88.** Fragmento de cerámica con abundante desengrasante y el aspecto negruzco de la pasta presente en fractura, nos indican que se tratan de una producción indígena. (Foto; Miguel Ángel Perelló).

**Figura 89.** Fragmento cerámico rojizo inclasificable tipológicamente debido a su pequeño tamaño. (Foto; Miguel Ángel Perelló).

**Figura 90.** Restos de cerámica fragmentada ubicada entre grandes rocas en la parte sumergida de la Sala de los Moros. La pieza, al igual que las anteriores, no se movió de su lugar por lo que no pudimos identificar bordes o asas que pudieran servirnos para identificarla. (Foto; John Kendall).

**Figura 91.** Fragmentos óseos de pequeño tamaño en muy mal estado de conservación. Probablemente sea una parte de hueso de lepórido. (Foto; John Kendall).

**Figura 92.** Representación de los puntos en superficie obtenidos por GPS diferencial y estación total y estudio topográfico de la poligonal cerrada en la parte sumergida, realizado a través del estudio de los diferentes dispositivos de mapeo junto con sistemas de radiolocalización. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 93.** Modelo fotogramétrico de la pasarela sumergida realizado por Manuel Fumás y procesado por José Moya de la Universidad de Alicante (UA).

**Figura 94.** Descenso por la entrada empedrada de la cova Genovesa de todo el material técnico necesario para la prospección y del emisor de radiolocalización MICROSUMMER. (Foto; Autor).

**Figura 95.** Imágenes de los distintos trabajos realizados en la cova Genovesa o d'en Bessó. **1.** El topógrafo Pablo Cantuel tomando puntos del inicio de la línea guía sumergida desde la entrada empedrada de la cova Genovesa con la estación total. (Foto; Autor). **2.** El técnico Juan Leandro ayudando en las labores de

topografía, en este caso sosteniendo el prisma en el cual el láser infrarrojo de la estación total toma la medición exacta. (Foto; Autor). **3.** Las labores de topografía en superficie continuaron por la noche debido a la gran cantidad de puntos necesarios para el cálculo de la poligonal. (Foto; Autor). **4.** Imagen de los espeleobuceadores, Javier Lario (izquierda) y Francesc Gràcia (derecha) colocando el emisor de radiolocalización MICROSUMMER en la Galería dels Myotragus en la cova Genovesa en la campaña del año 2020. (Foto; John Kendall). **5.** El técnico electrónico Juan Leandro (izquierda) y el arqueólogo Antonio J. Talavera (derecha) realizando los últimos cálculos para intentar encontrar la señal del emisor de radiolocalización MICROSUMMER. (Foto; Autor). **6.** El técnico Juan Leandro buscando la señal del emisor entre las casas de la urbanización de la calle Diego Velázquez en Cala Anguila. (Foto; Autor).

**Figura 96.** Sobreexposición de la lectura de línea del MNEMO (línea roja) tomada por el equipo del Proyecto Genovesa sobre la topografía manual realizada por el SEB en el programa ARIANE. En ella podemos ver como el porcentaje de error es mínimo, sobre todo en las primeras galerías de la cueva (Autor; Álvaro Granell).

**Figura 97.** Línea de lectura del MNEMO de Álvaro Granell (línea roja) sobre ortofotomapa, donde se puede observar el descampado entre las edificaciones donde se buscó la señal del emisor, justo en la intersección entre las líneas norte y sur. Fuente; elaboración propia.

**Figura 98.** Línea altimétrica tomada por la estación total desde la calle Leonardo da Vinci (líneas azules correspondientes a los cinco vértices observados con GPS con una altitud media de 20 metros sobre el nivel del mar) hasta el inicio de la línea sumergida (punto que aparece por debajo de la línea violeta que señala el nivel del mar) con una altitud negativa de -0.393 metros bajo el nivel del mar. Este punto final fue el inicial del MNEMO. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 99.** Imagen de los distintos puntos tomados por GPS diferencial (color azul) hasta llegar al último punto correspondiente al punto sumergido que inicia la lectura de línea del MNEMO. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 100.** El error en la coordenada de inicio nos desplazó todo el modelo topográfico obtenido en las lecturas del MNEMO (línea roja) casi 60 metros al sur

(línea amarilla) lo que nos permitió entender la importancia de una geo posición correcta del punto de partida de la lectura. Fuente; elaboración propia.

**Figura 101.** Imagen del software ARIANE donde aparece la línea de MNEMO correcta (línea roja), con el punto de inicio de lectura del hilo sumergido (estrella amarilla) calculado topográficamente con tolerancia topográfica centimétrica. Fuente; elaboración propia.

**Figura 102.** Imagen del ARIANE donde se muestra como la lectura del ENC2 (línea azul) fue completamente coincidente con el estudio de lectura de hilo llevado a cabo con el MNEMO de Granell (línea roja), por lo que este tercer método de mapeo nos garantizó con la máxima seguridad que nuestra lectura era correcta. Fuente; elaboración propia.

**Figura 103.** Vista general de la salita en el año 2002. Se trata de un cuarto de disolución (cámara freática) de poca altura, situada en un lateral de la Galería dels Myotragus (a unos 200 metros de la sala de Entrada). La disposición de los ejemplares indica que murieron in situ y no por una corriente de agua que transportara los huesos hacía el interior de la cámara. Se han contabilizado en superficie un mínimo de 12 ejemplares de *Myotragus balearicus*. La profundidad bajo las aguas es de 10,5 metros. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003).

**Figura 104.** Vista general de la salita en el año 2020 donde se puede observar el gran remanente de huesos de *Myotragus balearicus* todavía depositados en la cámara inundada paralela a la Galería dels Myotragus. El hecho de estar en un lugar de extrema dificultad en su acceso ha evitado el expolio de los huesos. (Foto; Miguel Ángel Perelló).

**Figura 105.** Tareas de prospección en la cova Genovesa; **1.** Imagen que muestra la extrema dificultad para conseguir fotos o vídeos nítidos si intentamos añadir una escala cerca de los huesos, debido a que el sedimento en suspensión provoca la desaparición de cualquier objeto en segundos. (Foto; Miguel Á. Perelló). **2.** Restos óseos de ovicaprino en la Sala de les Rates Pinyades, sala contigua al muro ciclópeo sumergido en el lago. (Foto; Autor). **3.** Imagen donde se muestra el muro sumergido que conecta las dos partes de suelo emergido que limitan el lago de la cueva. Actualmente se encuentra aproximadamente a -1 metro bajo las aguas. Sin embargo, en los bloques y en las paredes se puede observar, una marca horizontal

blanca, posiblemente un paleo nivel freático que nos indica que este paso se encontraba emergido en algún momento del pasado. Los estudios del nivel marino al Holoceno nos señalan un pequeño descenso del mar en la época de las navetas. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2003). 4. Imagen donde aparece John Kendall fotografiando el perímetro del muro sumergido donde no debían ser utilizados elementos de flotación ni botellas a causa de la gran facilidad de enturbiamiento del agua por el sedimento en suspensión. (Foto; Autor).

**Figura 106.** Vista en planta del muro sumergido en el lago de la cova Genovesa obtenido a través de fotogrametría y de la visualización por el programa Dronelab. Campaña 2020. (Autor; John Kendall).

**Figura 107.** La plataforma de visualización en línea Constructed permite tomar medidas de nuestro modelo 3D y compartir los cambios realizados con el objetivo final de crear una simbiosis entre distintos profesionales que puedan colaborar en el conocimiento y desarrollo del modelo, en nuestro caso el muro sumergido de la cova Genovesa. Fuente; elaboración propia.

**Figura 108.** Medición de extremo a extremo del muro sumergido que conecta las dos partes terrestres a ambos lados del lago interior. Fuente; elaboración propia.

**Figura 109.** Detalle de las distintas mediciones de longitudes y ángulos que permite el programa Constructed, lo cual permite conocer con exactitud las dimensiones del modelo fotogramétrico. Además, partiendo de tan solo una coordenada se puede conocer la geo posición de cada uno de los puntos a estudio del muro sumergido. Fuente; elaboración propia.

**Figura 110.** La zona amarilla nos indica una superficie total de 8.69 m<sup>2</sup> de extensión del muro sumergido compuesto por 14 rocas de gran tamaño y de varias de un tamaño menor. Fuente; elaboración propia.

**Figura 111.** Esquema básico orientativo que muestra la ubicación del estudio sedimentológico llevado a cabo en la campaña de viabilidad realizada el año 2018 en ambos lados de la pasarela sumergida de la cova Genovesa. El punto amarillo indica el punto 0, los puntos rojos indican los lugares donde se midió la potencia sedimentaria y el punto negro donde se extrajo el core estratigráfico (X: 4, Y: 15). Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2003).

**Figura 112.** Core estratigráfico extraído del subsuelo sumergido del lago de la entrada de la cova Genovesa. En él podemos diferenciar claramente sus estratos por su diferente color y granulometría producida por la escorrentía del suelo edáfico exterior. Fuente; elaboración propia.

**Figura 113.** Modificación de plano topográfico esquemático del cono de colapso, ubicado en la Sala de les Ànfores, con las dos líneas prospectivas utilizadas en el año 2018. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001).

**Figura 114.** Vista de la planta del yacimiento con las líneas prospectivas realizadas en la campaña de viabilidad metodológica de 2018. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001).

**Figura 115.** Planta de la topografía de la Sala de les Ànfores con la ubicación de las piezas extraídas. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001) (Modificación; Antonio J. Talavera).

**Figura 116.** Imágenes del equipo humano multidisciplinar del Proyecto IASCM; **1.** Trabajos de medición de la potencia sedimentaria mediante la introducción de una varilla metálica centrimetrada. (Foto; Autor). **2.** El técnico electrónico Ramón Buxó soldando las baterías del emisor de radiolocalización PINGER. (Foto; Autor). **3.** Miembro del GEAS colocando el arnés al Dr. Florian Huber antes de descender por el pozo de acceso. (Foto; Autor). **4.** El técnico en SIG Pablo Fraile ajustando los diferentes dispositivos antes de la inmersión. (Foto; Autor). **5.** Colocación del emisor PINGER sobre los restos óseos del *Myotragus balearicus* en la galería del mismo nombre. (Foto; Miguel Ángel Perelló).

**Figura 117.** Documentación topográfica de la cova de la Font de Ses Aiguades mediante la utilización del mapeo por hilo y la radiolocalización. **1.** Detalle del punto GPS en el cual se localizó la señal del emisor PINGER. (Autor; Pablo Fraile). **2.** Topografía sobre ortofotomapa con detalle del punto de localización del emisor PINGER. Fuente; (Autor; Pablo Fraile). **3.** Error en el acimut de la línea tomada por el MNEMO en la cova de la Font de Ses Aiguades en la campaña arqueológica de 2019. Fuente; elaboración propia. **4.** Ortofotomapa con superposición de la planta topográfica de la cavidad con error de línea del MNEMO y con la ubicación de PINGER en la denominada Galería dels Myotragus. (Autor; Pablo Fraile).

**Figura 118.** Polígono sobre ortofotomapa (color azul) donde se indica el lugar donde se tomó cada uno de los puntos adicionales para corroborar el punto 5000, correspondiente con la coordenada final respecto a la vertical del pozo de la cova de la Font de Ses Aiguades (flecha amarilla). (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 119.** Imagen donde se aprecia la metodología topográfica utilizada para obtener el punto 0 de control correspondiente al vértice superior del cono arqueológico sumergido de la cova de la Font de Ses Aiguades. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 120.** El topógrafo Pablo Cantuel tomando puntos con la estación total en el acceso a la cova de la Font de Ses Aiguades. **1.** Imagen de la estación total, la cual permitió realizar los cálculos de coordenadas de campo, replanteo de puntos y cálculo de acimut y distancias. (Foto; Autor) **2.** El topógrafo Pablo Cantuel midiendo la distancia con cinta métrica desde el gancho hasta el nivel freático del agua en la campaña arqueológica del año 2020. (Foto; Autor).

**Figura 121.** Modelo fotogramétrico incompleto del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades realizado en la campaña 2019, donde la falta de una metodología de trabajo correcta provocó un modelo sin orientación ni escala. (Autor; Florian Huber).

**Figura 122.** Imágenes de la campaña 2020 en la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Cerámica procedente de la campaña de extracción del año 1999 conservados en el Museo de Mallorca. (Imágenes tomadas para el documental de la TV suiza SRF1). **2.** Detalle de la cerámica conservada en el Museo de Mallorca procedente del yacimiento arqueológico de la cova de la Font de Ses Aiguades. (Imágenes tomadas para el documental de la TV suiza SRF1). **3.** Técnicos de la Federación Espeleológica Balear (FEB) encargados de la seguridad del equipo de inmersión y de bajar los equipos técnicos por la vertical del pozo. (Foto; Autor). **4.** Detalle de las etiquetas y jalones utilizados para registrar los remanentes cerámicos de la cueva. (Foto; Autor).

**Figura 123.** Distintas morfologías del cono de la Sala de les Àmfores; **1.** Topografía clásica de la cueva con las diferentes curvas de nivel de profundidad. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001). **2.** Nueva morfología del cono obtenida

mediante la obtención del modelo fotogramétrico con las curvas de nivel en profundidad. (Autor; John Kendall).

**Figura 124.** Trabajos de fotogrametría subacuática en la cova de la Font de Ses Aiguades. **1.** Fotografía del momento en que John Kendall fotografiaba la pieza número 22 correspondiente a una jarra musulmana. (Foto; Miguel Ángel Perelló). **2.** Modelo fotogramétrico 3D realizado por John Kendall para el Proyecto IASCM 2020. Esta es la primera vez que podemos observar el cono de escombros completo sin los denominados “gaps” o huecos que se producen por un mal solapamiento de las fotografías durante el renderizado del modelo. (Autor; John Kendall). **3.** La vista en planta del conjunto arqueológico nos da una idea más fidedigna de las dimensiones del cono y de la distribución del material arqueológico. Una pirámide de rocas, sedimento y gravas compactadas junto a pequeños fragmentos de cerámica diseminada sin orden lógico por toda la pirámide. (Autor; John Kendall). **4.** Captura de pantalla del modelo 3D de la plataforma Sketchfab correspondiente a un cántaro mallorquín (1700 d.C.). (Autor; John Kendall). **5.** Captura de pantalla del modelo 3D de la plataforma Sketchfab correspondiente a un cántaro ánfora Pascual 1 Tarraconense. (Autor; John Kendall). **6.** Captura de pantalla del modelo 3D de la plataforma Sketchfab correspondiente a un cántaro mallorquín fragmentado (1700 d.C.). (Autor; John Kendall).

**Figura 125.** Modelo fotogramétrico en planta, en el cual se indican las curvas de nivel en metros de profundidad, sobre cuadrícula escalada y orientada. (Autor; John Kendall).

**Figura 126.** Planta del modelo fotogramétrico de Kendall realizado con el software Agisoft Metashape Professional donde se aprecian las curvas de nivel. (Autor; John Kendall y adaptación de Antonio J. Talavera).

**Figura 127.** Dibujo representativo de la metodología usada para la geolocalización, posicionamiento y documentación manual de las piezas arqueológicas. (Autor; Antonio J. Talavera).

**Figura 128.** Planta del yacimiento arqueológico con el detalle del punto 0 y las diferentes radiales medidas desde ese punto de control. (Autor; Pablo Cantuel).

**Figura 129.** Gracias al conocimiento de la ubicación exacta de la coordenada correspondiente al punto 0 podíamos conocer la coordenada X, Y y Z de cada una de las piezas registradas manualmente del yacimiento. (Autor; John Kendall).

**Figura 130.** Modelo fotogramétrico completo del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades en Alcanada donde se aprecia las curvas de nivel y la numeración y ubicación de las diferentes piezas cerámicas documentadas. (Autor; John Kendall).

**Figura 131.** Restos paleontológicos sumergidos en la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Restos óseos de *Myotragus balearicus* en la galería sumergida del mismo nombre en la cova de la Font de Ses Aiguades. (Foto; Miguel A. Perelló). **2.** Dibujo arqueológico mediante la vectorización de la imagen. (Realizado por Gabriel Graff para el Proyecto IASCM 2019).

**Figura 132.** Datos extraídos mediante el software de aplicación de colorimetría en el objeto cerámico núm. 7 del yacimiento arqueológico de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Parte superior del cuerpo de un ánfora (núm.7) donde se aprecia parte del *titulus pictus* en el que se puede observar VF o quizá VE y posiblemente en la parte inferior RT. (Foto; Miguel Ángel Perelló). **2.** Aplicación de la primera descorrelación donde se aprecia las marcas de rozamiento sufridas por la pieza. Fuente; elaboración propia. **3.** La aplicación de contrastes en los colores permite la mejor visualización de marcas pictográficas en la cerámica. Fuente; elaboración propia. **4.** El programa Image J permite la ampliación de las imágenes y el empleo de diferentes filtros de espacio-color, con lo cual se consigue visualizar mejor posibles inscripciones ocultas. Fuente; elaboración propia.

**Figura 133.** Restos paleontológicos en la base del cono del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Cráneo de un caprido que podría pertenecer a los restos óseos del *Myotragus balearicus*. Campaña del año 2020. (Foto; John Kendall). **2.** Detalle de la ubicación del cráneo en la falda inferior del cono de escombros del yacimiento de Ses Aiguades. (Foto; John Kendall).

**Figura 134.** Detalle de los restos óseos sumergidos en el yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Detalle del cuerno del cráneo medido por el software Agisoft Metashape Professional. (Autor; John Kendall). **2.** El programa fotogramétrico Agisoft Metashape Professional es capaz de tomar medidas

exactas de cualquier elemento gracias al escalado previo del modelo. (Autor; John Kendall).

**Figura 135.** Bacterias presentes en la muestra de agua recogida de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Imagen microscópica del agua de Ses Aiguades donde aparecen formas vivas flageladas del euglénido Bodo. (Autor; Antonio Guillén Oterino). **2.** En la muestra del análisis biológico del agua de Ses Aiguades también aparecen algunas formas bacterianas cocoides muy escasas. (Autor; Antonio Guillén Oterino).

**Figura 136.** Miembros del equipo Falconera analizando los primeros resultados obtenidas por la sonda multihaz acoplada al AUV SPARUS II en el puerto del Garraf. (Foto; Autor).

**Figura 137.** Captura de pantalla del software Visual Topo, programa con el cual se ha realizado la topografía actual de la cavidad. La flecha indica donde se ubica espacialmente la Sala de los Moros. Fuente; Francesc Gràcia.

**Figura 138.** Imágenes de los trabajos realizados en la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou en las campañas 2019 y 2020; **1.** Entrada terrestre obstruida por rocas que da acceso a la entrada secundaria a la cavidad denominada Sala de los Moros. (Foto; Autor). **2.** Acumulación de toneladas de piedra a causa de despedregar los campos agrícolas circundantes a la entrada a la Sala de los Moros. (Foto; Autor). **3.** Cámara aérea de la Sala de los Moros obstruida por el colapso y obstrucción rocosa de origen antrópico. (Foto; Florian Huber). **4.** y **5.** Restos de cerámica encontrados en la pendiente de derrumbe de la Sala de los Moros. (Foto; Florian Huber). **6** y **7.** Resto cerámico encontrado en la Sala Francesc Ripoll, posiblemente un cántaro mallorquín producido entre el s. XVII y el s. XX d.C. (Foto Florian Huber). **8** y **9.** Labores de localización de la señal del emisor y detalle del receptor del PINGER. (Foto; Autor). **10.** Detalles arquitectónicos del yacimiento arqueológico de Es Bosquets. (Foto; Autor).

**Figura 139.** Foto extraída del archivo de mapas históricos (AMS 1956-1957) donde se aprecia la entrada de la cueva. Fuente; IGN.

**Figura 140.** Imagen de dron donde se aprecia la parcelación actual de la tierra de Son Josep Nou y la ubicación de la entrada principal de la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou, la entrada secundaria, que da acceso a la Sala de los Moros,

y el yacimiento arqueológico más cercano correspondiente a Es Bosquets. (Foto; Florian Huber).

**Figura 141.** Plano SIG sobre ortofotomapa donde aparecen los yacimientos arqueológicos circundantes más próximos a la cova del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou y donde apreciamos la distancia recorrida en el mapeo por hilo del MNEMO y la ubicación del radiolocalizador PINGER en la superficie terrestre. (Autor; Pablo Fraile).

**Figura 142.** Imágenes de las construcciones en piedra seca de los yacimientos arqueológicos de Es Bosquet y Can Frasquet. **1.** Restos del muro de piedra del yacimiento arqueológico de Es Bosquets, el cual probablemente tenía una relación directa con los puntos de aguada que ofrece la cavidad del Sistema Sa Gleda-Camp des Pou. Fuente; (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016). **2.** Muro de piedra de gran extensión perteneciente también al yacimiento de Es Bosquets. (Foto; Autor). **3.** Imagen de los miles de restos de cerámica fragmentada dispersa por los restos de piedra del yacimiento de Es Bosquets. (Foto; Autor). **4.** Restos de muro del yacimiento arqueológico de Can Frasquet de posible cronología talayótica. Fuente; (Gabinet d'Anàlisi Ambiental i Territorial., 2016).

**Figura 143.** Imagen de diferentes cráneos pertenecientes a distintas especies de capridos. Fuente; (Palombo *et al.*, 2006).

**Figura 144.** Detalle de las diferentes óseas entre las dos especies caprinas reflejadas en la morfología de su cráneo. Fuente; (Palombo *et al.*, 2006).

**Figura 145.** Detalles morfológicos craneales indicados mediante fechas elaborado por la zooarqueóloga Alba Ruiz para el Proyecto IASCM. (Foto; John Kendall).

**Figura 146.** Cráneo de un *Myotragus balearicus* desde su parte dorsal y lateral. Escala 20 milímetros. Fuente; (Palombo *et al.*, 2006).

**Figura 147.** Ortofotomapa del IGN del año 1956 en Alcanada (línea amarilla indica la distancia entre la costa y el acceso a la cueva) donde se aprecia la cantera donde se extraía escollera para el puerto de Alcúdia. Fuente; IGN.

**Figura 148.** Ortofotomapa del PNOA extraída de la página del IGN del año 1997 de la zona de Alcanada donde vemos como aparecen ya los accesos al campo de

golf, las urbanizaciones colindantes con las obras finalizadas y la cantera cubierta por vegetación. Es en esta ocasión cuando dice la gente del lugar que el hecho de haberse construido la caseta de obra sobre el pozo de acceso a la cavidad lo que protegió a la misma del desprendimiento de rocas y sedimento de la obra de construcción y asfaltado. Fuente; IGN.

**Figura 149.** Imágenes antiguas de la zona de extracción de la cantera sobre la cova de la Font de Ses Aiguades y del puerto de Alcúdia; **1.** Locomotora Orenstein & Koppel 020T 11 arrastrando los vagones bateas de escombrera desde la cantera hasta el puerto de Alcúdia. Fuente; (Molina De Dios, 1995). **2.** Foto obtenida del Archivo del Fondo histórico de ENDESA del muelle y la central térmica de Alcudia. **3.** Grúas trabajando sobre la cova de la Font de Ses Aiguades acumulando rocas para ser transportadas por las vagonetas del tren a Alcudia. Fuente; (Molina De Dios, 1995). **4.** Puerto de Alcudia en la actualidad donde todavía se puede observar la escollera extraída de la cantera ubicada sobre la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; <https://www.portsdebalears.com/es/alcudia>.

**Figura 150.** Ubicación de los dos puntos que recorría la línea férrea para el transporte de la escollera desde la cantera al puerto. Fuente; Google Earth.

**Figura 151.** Obras de urbanización y acceso al campo de golf de Alcanada en los años 90 donde se aprecia como la caseta protege la cavidad. (Foto; Francesc Gràcia).

**Figura 152.** Imágenes de la cueva sumergida de la cova de la Font de Ses Aiguades; **1.** Imagen de la escollera sumergida en el interior de la cavidad de la Font de Ses Aiguades formando el cono de escombros donde hay material arqueológico dentro de la campaña del año 2020. (Foto; Autor). **2.** Restos cerámicos sumergidos recuperados en la campaña de 1998 encabezada por Francesc Gràcia. (Foto; Francesc Gràcia). **3.** Espeleo-buceador recuperando un ánfora de la parte inferior del cono, donde abunda el limo, en la campaña de 1998. (Foto. Francesc Gràcia). **4.** Imagen de la topografía de la cueva adaptada a hipótesis. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2001).

**Figura 153.** Visión cenital del yacimiento con los números de las piezas geo posicionadas y dividida de forma esquemática por cuadrículas. Fuente; Adaptación de la fotogrametría de John Kendall para el Proyecto IASCM 2020.

**Figura 154.** Ortofotomapa del área donde se encuentra la cova Genovesa, en la cual se puede observar el trazado del MNEMO (línea roja), la entrada a la cueva (estrella amarilla) y la ubicación de la pequeña Sala dels Myotragus (cuadro amarillo). Esta sala, según las coordenadas obtenidas del ARIANE, se encuentra ubicada en las coordenadas UTM 31N X: 527165.7, Y: 4375130. Fuente; elaboración propia.

**Figura 155.** Ortofotomapa histórica en blanco y negro del año 1953 donde podemos observar la Cala Anguila sin urbanizar y con una única entrada a la cova Genovesa. Fuente; IGN.

**Figura 156.** Ortofotomapa actual donde podemos observar el cambio urbanístico que ha sufrido Cala Anguila y Cala Mendía alrededor de la entrada de la cova Genovesa (pincho amarillo). Fuente; Google Earth.

**Figura 157.** Organigrama metodológico de las cinco fases a realizar para la obtención de resultados óptimos en la consecución de un proyecto arqueológico prospectivo riguroso en cavidades sumergidas. Fuente; (Fumás, 2022b).

**Figura 158.** Imágenes del material técnico utilizado en la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM; **1.** Imagen donde aparece un escúter de aluminio de la marca SEACRAFT y un CCR o reciclador de aire lateral de la marca T-REB. (Foto; Autor). **2.** Imagen del topógrafo Pablo Cantuel tomando la coordenada con un GPS diferencial en la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM. (Foto; Autor). **3.** Furgonetas cargadas del material necesario para poder llevar los trabajos de prospección en la cova de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia) en la campaña del año 2020 del Proyecto IASCM. (Foto; Autor). **4.** Material de buceo y rápel necesario para la entrada y prospección de la cavidad de la Font de Ses Aiguades (Alcúdia) tan solo para el equipo de una inmersión de las múltiples necesarias en un solo día. Campaña del año 2020 del Proyecto IASCM. (Foto; Autor).

**Figura 159.** El piloto de dron, Enrique Sala, ajustando y calibrando el dispositivo antes del vuelo sobre la cova del Gegant. (Foto; Autor).

**Figura 160.** Actividades de divulgación y difusión de resultados científicos para el público en general. Fuente; (Velandia, 2020).

**Figura 161.** Presentación de los resultados del Proyecto IASCM al IV Simposio Internacional de Historia y Arqueología Marítimas. Uniendo a través de mares y océanos. (noviembre 2019.Cartagena-Murcia). (Foto; Autor).

**Figura 162.** Póster presentado en el I Congreso Iberoamericano de Arqueología Náutica y Subacuática (Cianys) en octubre de 2021. Fuente; elaboración propia.

**Figura 163.** Dibujo esquemático general de las diferentes metodologías prospectivas utilizadas en las campañas de trabajo. (Autor; Antonio J. Talavera).

**Figura 164.** Vista frontal del derrumbe de la Sala de los Moros desde la Galería Cinc Cents en la cual se han basado parte de los estudios prospectivos del presente trabajo con la utilización y medición de los distintos dispositivos de mapeo utilizados. (Foto; Florian Huber).

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

**Gráfico 1;** Oscilaciones del mar Mediterráneo en los últimos 600.000 años (ka), el mar alcanzó una elevación máxima de 5 a 10 m sobre el nivel del mar actual durante el estadio MIS 5, y al menos dos veces más durante el Pleistoceno Medio. Hay que señalar también que el nivel descendió más de 100 m por debajo del nivel del mar actual, al menos cinco veces a lo largo del Pleistoceno Medio y superior. Fuente; (Lichter *et al.*, 2010).

**Gráfico 2.** Evolución del nivel del mar Mediterráneo en metros (izquierda) integrando los datos máximos y mínimos desde el Pleistoceno hasta la actualidad. Fuente; (Rabineau *et al.*, 2006).

**Gráfico 3.** Lectura vertical de la potencia del sedimento sumergido mediante la extracción de dos cores estratigráficos (R1 a 16 metros y R2 a 20 metros) con acimut de 150°. Fuente; elaboración propia.

**Gráfico 4.** Lectura de la profundidad del suelo marino y profundidad de la columna de agua de la ubicación donde se realizó la extracción de cores los estratigráficos (R1 y R2). Fuente; elaboración propia.

**Gráfico 5.** Perfil de las mediciones de distancia y profundidad tomadas por el MNEMO desde el Punto 0 en la entrada a la cavidad hasta la primera restricción denominada Pas d'en Carles. Fuente; (Fumás, 2022a).

**Gráfico 6.** Potencia o grosor del sedimento en centímetros en el interior de la Galería Jaume Ferran desde el punto 2 del MNEMO. Fuente; (Fumás, 2022a).

**Gráfico 7.** Lectura de las distintas profundidades tomadas por el ENC2 en el software ARIANE. Fuente; elaboración propia.

**Gráfico 8.** Lectura de las distintas profundidades tomadas por el MNEMO en el software ARIANE. Fuente; elaboración propia.

**Gráfico 9.** Estudio del perfil hidrico de la cavidad realizado con sonda CTD donde se aprecia la variación de temperatura y salinidad respecto a la profundidad. Fuente; (Gràcia *et al.*, 2020).

**Gráfico 10.** Interrelación entre profundidad y potencia sedimentológica del sedimento en la zona W del lago de la Sala de Entrada de la cova Genovesa. Fuente; elaboración propia.

**Gráfico 11.** Valores obtenidos de la columna de agua medidos con CTD donde se aprecia el aumento de temperatura y salinidad a medida que ganamos profundidad. Fuente; IMEDEA. UiB para Proyecto IASCM.

**Gráfico 12.** Perfil de Salinidad (‰) en la Sala de Entrada. La gráfica nos muestra como en los primeros metros de profundidad el agua tiene un carácter salobre, el cual va aumentando a medida que ganamos en profundidad. Fuente; Adaptación (Gràcia *et al.*, 2003).

## ÍNDICE DE TABLAS

**Tabla 1.** Formula a aplicar para aplicar la conversión a una proyección rectilínea. Fuente; (Kincaid, 2000).

**Tabla 2.** Ecuaciones y ejemplos para el cálculo de la marcación, la latitud y la salida de las mediciones del acimut y la distancia, donde (dr) es la distancia rectilínea entre dos estaciones consecutivas. Fuente; (Kincaid, 2000).

**Tabla 3.** Formula a aplicar para la obtención de las coordenadas X, Y y Z. Fuente; (Kincaid, 2000).

**Tabla 4.** Evolución del nivel marinos desde el final del Pleistoceno Superior y el Holoceno en el hemisferio norte. Fuente; (Edeso-Fito y Mujika-Alustiza, 2017).

**Tabla 5.** Coordenadas obtenidas a través del cálculo con la estación total y el GPS diferencial. (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 6.** Datos obtenida tras la medición manual de la dispersión cerámica en la Sala de los Moros aplicando trigonometría para el cálculo del cateto B. Fuente; elaboración propia.

**Tabla 7.** Cálculo de la dispersión cerámica a través del método de radiación de topografía manual aplicada en la Sala de los Moros para la obtención de las cuatro coordenadas pertenecientes a los remanentes arqueológicos. (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 8.** Coordenadas de los puntos observados con GPS para la obtención del punto 22 o punto final de la poligonal a estudio. La obtención de la cota ortométrica del punto 22 fue posible gracias a que se conocía por otros medios convencionales de superficie la cota ortométrica de la lámina de agua vertical medida directamente en campo con cinta métrica entre el radiolocalizador y la lámina de agua. (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 9.** Coordenadas georreferenciadas obtenidas por topografía clásica de superficie con estación total. El punto 5000 (color amarillo) indica la coordenada exacta de la entrada al pozo de acceso a la cova de la Font de Ses Aiguades. (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 10.** Observaciones de campo de la poligonal de ida y vuelta realizadas con el dispositivo de mapeo MNEMO y desviaciones entre la poligonal de ida y vuelta (en color algunas de las desviaciones más importantes y los valores de las desviaciones medias). (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 11.** Coordenadas georreferenciadas compensadas de la poligonal cerrada interior de la cueva. En azul se indican las coordenadas y las precisiones del primer y el último punto de la poligonal y en amarillo los puntos donde se consiguió mayores precisiones en X, Y y H. (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 12.** Resultados del cálculo de coordenadas en superficie obtenidas por el topógrafo Pablo Cantuel. En verde aparece la coordenada final de la poligonal y punto 0 de partida del hilo guía sumergido. (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 13.** Diferentes variables en la medición de la potencia sedimentológica existente bajo el agua del lago. Fuente; elaboración propia.

**Tabla 14.** Datos del software ARIANE con las mediciones de los tracks realizados en la cova de la Font de Ses Aiguades donde se aprecia en el círculo rojo como el acimut de entrada a la línea era de  $48.8^\circ$  y el acimut de salida  $95.8^\circ$ , siendo valores muy alejados uno del otro. Fuente; elaboración propia.

**Tabla 15.** Diferentes coordenadas de los seis puntos tomados con la estación total. La fila verde indica las coordenadas del punto 5000 correspondiente al punto 0 (Autor; Pablo Cantuel).

**Tabla 16.** Coordenadas locales y globales obtenidas por el programa fotogramétrico Agisoft Metashape Professional (Autor; John Kendall).

**Tabla 17.** Cálculo trigonométrico obtenido para conocer la longitud en metros del cateto b, necesario para el geoposicionamiento planimétrico de las piezas sumergidas del yacimiento de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; elaboración propia.

**Tabla 18.** Datos orientativos de los valores generales establecidos para los distintos tipos de agua. Fuente; (Mantyla, 1986).

**Tabla 19.** Valores obtenidos en el laboratorio tras el análisis químico del agua de la cova de la Font de Ses Aiguades. Fuente; (UZ y UiB).

**Tabla 20.** Comparación de los diferentes valores entre los parámetros estándares y los obtenidos tras el análisis del agua de la cavidad. Fuente; elaboración propia.

**Tabla 21.** Datos físico- químicos de la muestra de agua analizada por el Dr. Guillen para el Proyecto IASCM 2020.

**Tabla 22.** Técnicas y metodologías de prospección utilizadas en cada una de las cavidades estudiadas en la presente tesis. Fuente; elaboración propia.

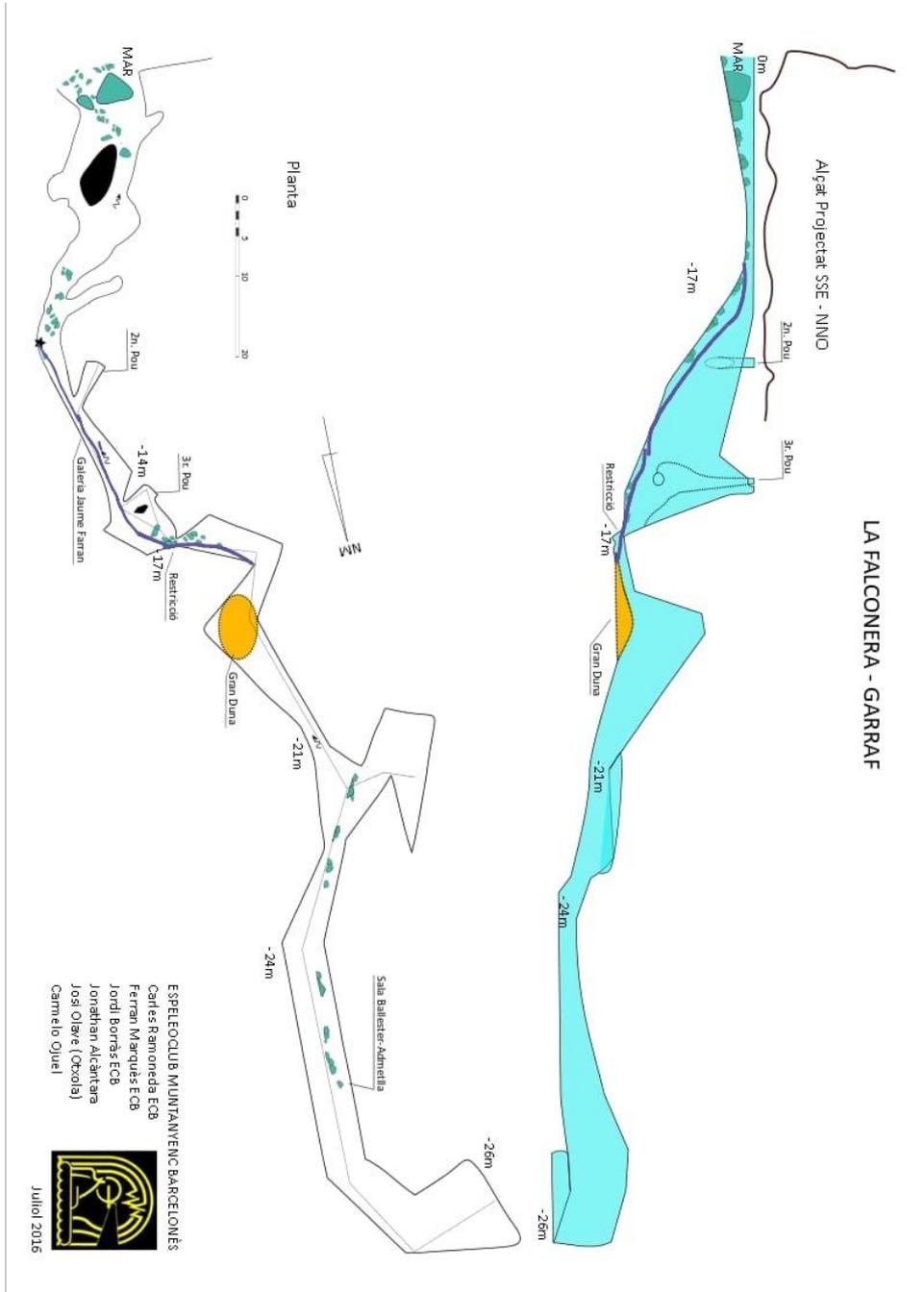
**Tabla 23.** Inventario arqueológico de la campaña de prospección en cova de la Font de Ses Aiguades del año 2020. (Autor; Antonio J. Talavera).

**WEBS DE INTERÉS**

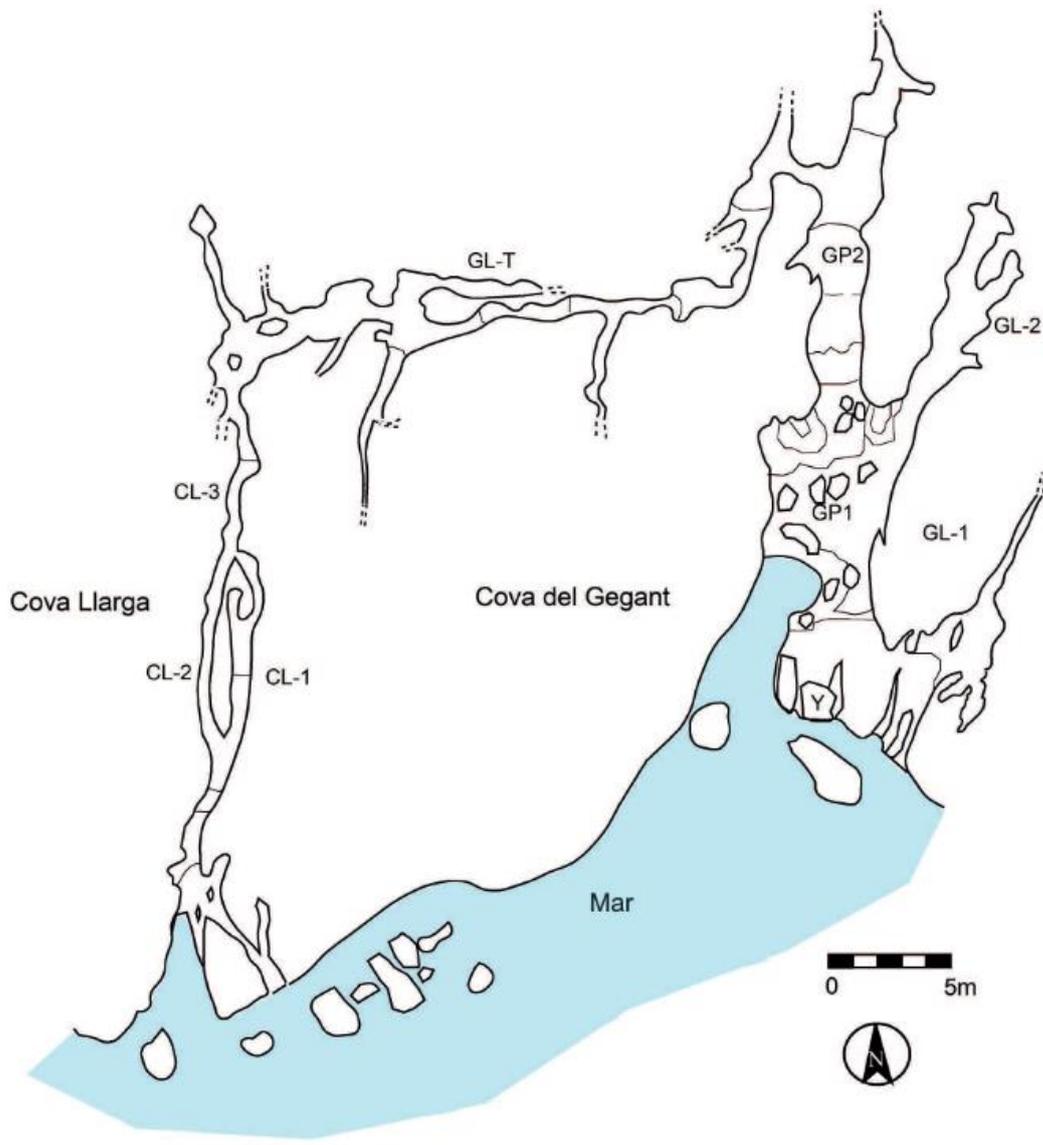
<b>Fuente</b>	<b>Enlace</b>
SPLASHCOS	<a href="https://www.splashcos.org/">https://www.splashcos.org/</a>
Visor SPLASHCOS	<a href="http://splashcos-viewer.eu/">http://splashcos-viewer.eu/</a>
SOCIETAT ESPELEOLÒGICA BALEAR	<a href="http://socespbal.blogspot.com/">http://socespbal.blogspot.com/</a>
MATLAB	<a href="https://www.mathworks.com/products/matlab.html">https://www.mathworks.com/products/matlab.html</a>
ENC3 SEACRAF	<a href="https://seacraft.eu/products/navigation-console/enc3/">https://seacraft.eu/products/navigation-console/enc3/</a>
INSTITUTO NACIONAL DE ANTROPOLOGIA E HISTORIA	<a href="https://www.inah.gob.mx/">https://www.inah.gob.mx/</a>
SUNFISH	<a href="https://sunfishinc.com/">https://sunfishinc.com/</a>
DRASSM	<a href="https://archeologie.culture.fr/fr/drassm">https://archeologie.culture.fr/fr/drassm</a>
CINDAQ	<a href="https://es.cindaq.org/">https://es.cindaq.org/</a>
GRAN ACUIFERO MAYA	<a href="https://granacuiferomaya.org/proyectos/">https://granacuiferomaya.org/proyectos/</a>
REVISTA ENDINS	<a href="https://raco.cat/index.php/Endins">https://raco.cat/index.php/Endins</a>
ARIANE'S LINE	<a href="https://www.arianesline.com/">https://www.arianesline.com/</a>
BRITISH CAVING ASSOCIATION	<a href="https://british-caving.org.uk/">https://british-caving.org.uk/</a>
BRITISH CAVE RESEARCH ASSOCIATION	<a href="https://bcra.org.uk/">https://bcra.org.uk/</a>
DRONLAB	<a href="http://dronlab.unex.es">http://dronlab.unex.es</a>
DSTRETCH	<a href="https://www.dstretch.com/">https://www.dstretch.com/</a>
GIRONA UNDERWATER VISION AND ROBOTICS	<a href="https://cirs.udg.edu/">https://cirs.udg.edu/</a>
BOXFISH RESEARCH	<a href="https://www.boxfish.nz/">https://www.boxfish.nz/</a>
SKETCHFAB	<a href="https://sketchfab.com/">https://sketchfab.com/</a>
CONSTRUKTED	<a href="https://construktred.com/">https://construktred.com/</a>
WINTOPO	<a href="http://wintopo.com/">http://wintopo.com/</a>
SURVEX	<a href="https://survex.com/">https://survex.com/</a>
AGISOFT	<a href="https://www.agisoft.com/">https://www.agisoft.com/</a>
INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL	<a href="https://www.ign.es/web/ign/portal">https://www.ign.es/web/ign/portal</a>
INSTITUT CARTOGRÀFIC I GEOLÒGIC DE CATALUNYA	<a href="https://www.icgc.cat/es">https://www.icgc.cat/es</a>
BLENDER	<a href="https://www.blender.org/">https://www.blender.org/</a>
MESHLAB	<a href="https://www.meshlab.net/">https://www.meshlab.net/</a>

# ANEXO I. TOPOGRAFÍAS

## COVA DE LA FALCONERA



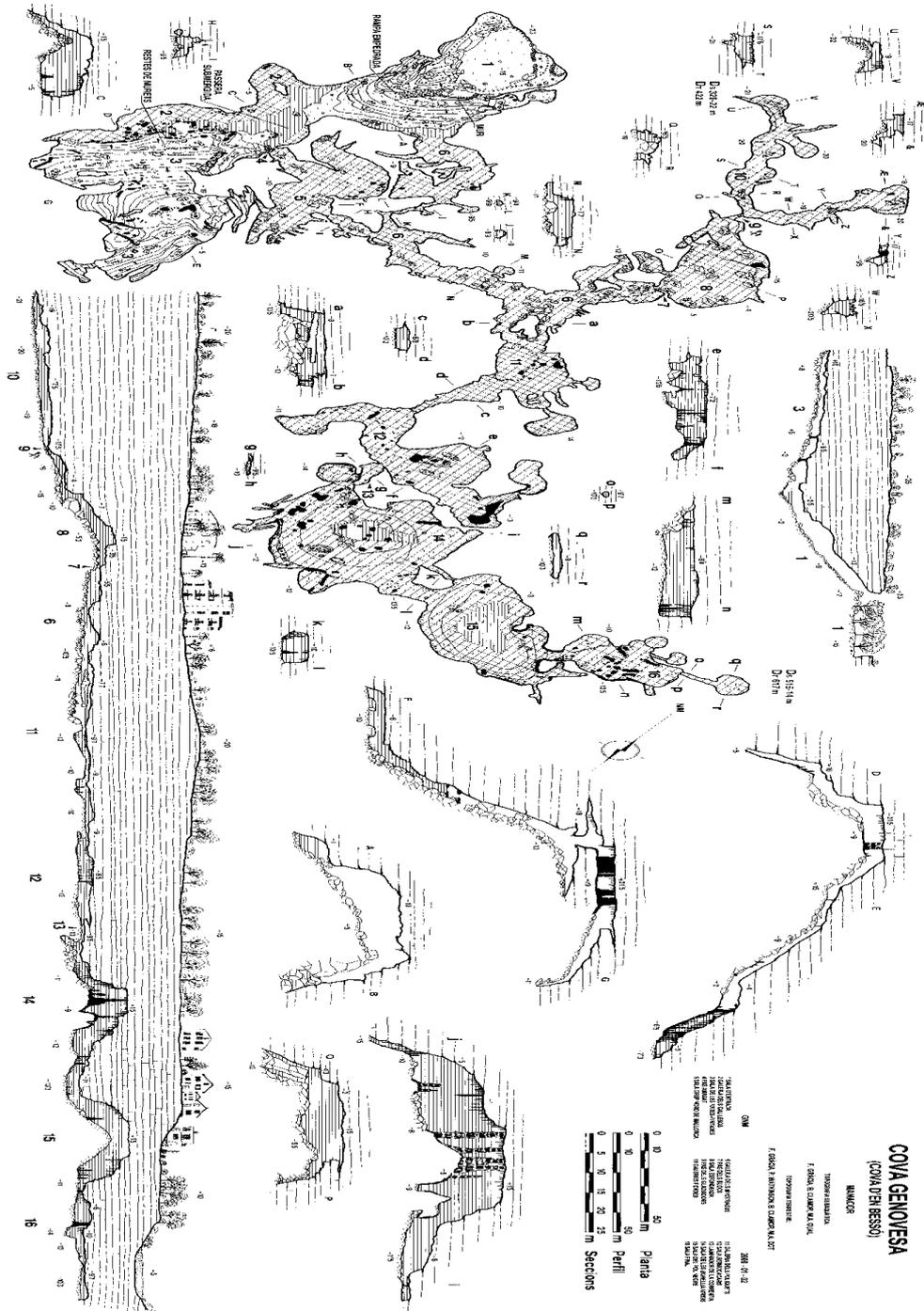
## COVA DEL GEGANT



Topografía según A. Albalade, M. Marín, J. Marín (Viñas, 1972); del sector S y SG Mora (1988)

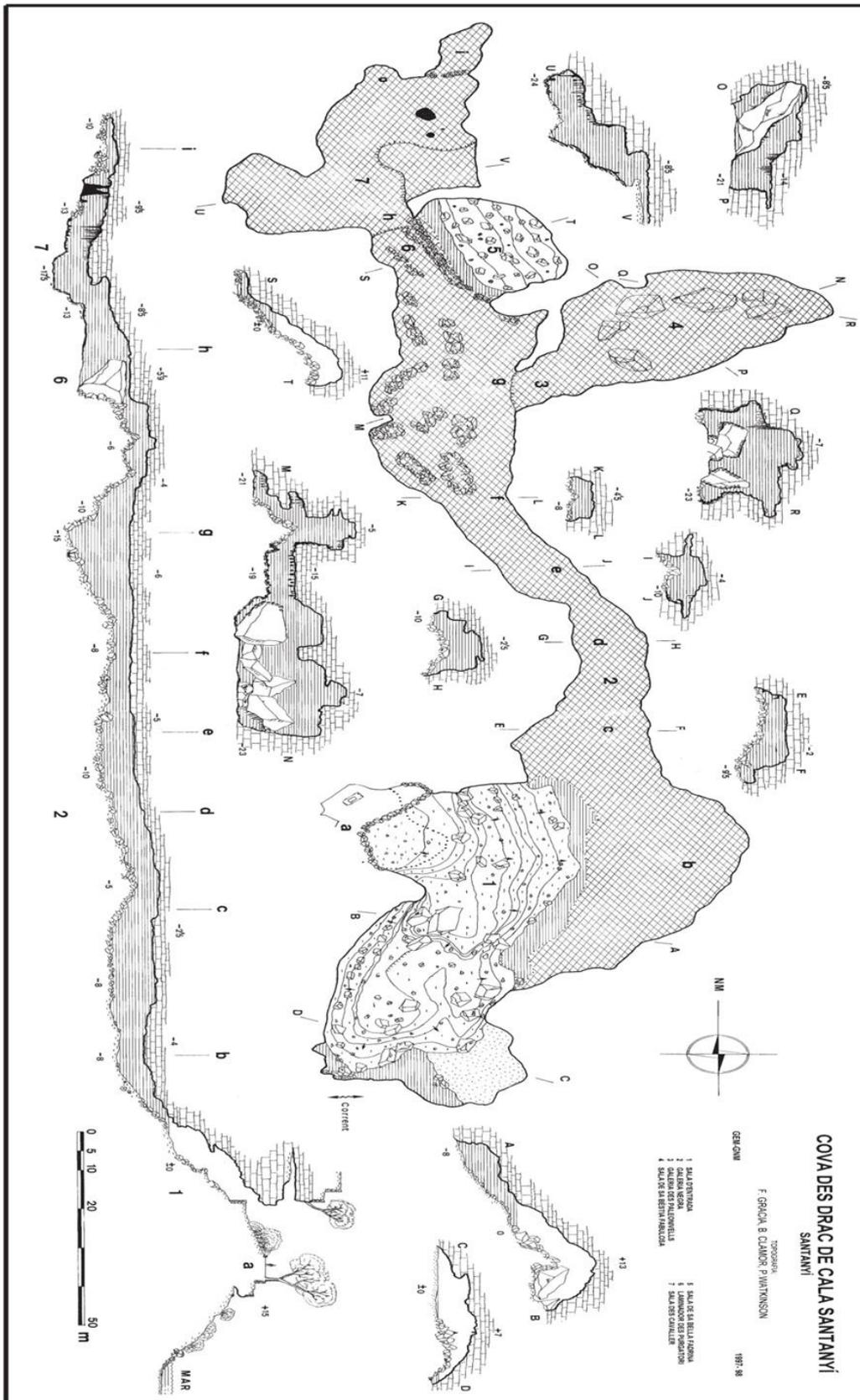
A

# COVA GENOVESA O D'EN BESSÓ





# COVA DES DRAC DE CALA SANTANYÍ





## **ANEXO II. TÉCNICAS FUNDAMENTALES QUE DESARROLLAR EN EL ESPELEOBUCEO**

Como se ha mencionado anteriormente, son muchos los requisitos burocráticos, logísticos, metodológicos y técnicos para desarrollar un proyecto científico arqueológico. Pero, sin duda, al igual que una casa necesita cimientos, todos los miembros del equipo de inmersión deben dominar y desarrollar una serie de técnicas de buceo fundamentales para lograr sobrevivir, tanto a nivel particular como a nivel colectivo, dentro de un sistema cárstico confinado. Para ello existen una serie de certificadoras de buceo técnico como son; Global Underwater Explorer (GUE), Technical Diving International (TDI), International Association of Nitrox and Technical Divers (IANTD) o Unified Team Diving (UTD) entre otras muchas, que forman a los alumnos para conseguir los más altos estándares en el buceo en cuevas.

En nuestro caso, lejos de enumerar detalladamente cada una de las técnicas de buceo, debido a que no es materia de estudio en esta tesis, pasaremos a describir brevemente los conocimientos básicos necesarios para mantener la seguridad del equipo de inmersión en un trabajo arqueológico en cuevas inundadas. Para ello tomaremos como referencia la guía de la Technical Diving International (TDI) (Technical Diving International (TDI), 1994).

Las técnicas más importantes son:

### **FLOTABILIDAD**

La flotabilidad es una disciplina la cual debe dominarse y para ello es necesario mucha práctica, experiencia, y el tiempo de inmersión. Una flotabilidad neutra inicial se obtiene utilizando el chaleco/ala o sistema de control, pero el ajuste fino se obtiene mediante el control de la respiración. La elección del equipo afectará a la cantidad de gas que se debe ser introducida en el chaleco para mantener la flotabilidad neutra. Para minimizar la cantidad de gas necesario en la consecución de una flotabilidad adecuada el espeleo-buceador debe seleccionar el equipo que

más se ajuste al peso que necesita como el material de lastre y el traje de inmersión puesto que los diferentes trajes húmedos tienen diferentes características de volumen y peso. Por el contrario, los trajes secos son mucho más comunes en los buceadores de cuevas y esto añade complejidad a la flotabilidad y al propio buceo ya que cuando se usa un traje seco éste solo introduce la cantidad de gas necesaria para estar comfortable. Debemos recordar que introducir gas de más, entraña dificultad para nadar y para conservar la flotabilidad. El gas pesa, y cuando se va consumiendo, la flotabilidad se ve afectada. Es necesario conseguir una flotabilidad neutra tanto con las botellas llenas como vacías y para ello el sistema de control de la flotabilidad debe tener la capacidad suficiente para acometer los cambios que se puedan dar en la flotabilidad del buceador puesto que es primordial mantener durante todo el tiempo una posición con respecto a la columna de agua sin apenas variación. Un buen control de la flotabilidad reduce el riesgo de levantar sedimento, de arrastramiento, de reducción de la fatiga, ayudando a mantener un buen trimado, y a prevenir daños en el entorno.

## TRIMADO

El trimado o trim hace referencia a la posición y orientación del cuerpo del buceador en el agua y juega un papel crítico en la seguridad y la conservación mientras bucea. Un mal trimado puede llevar a la pérdida de visibilidad, a dañar el entorno de la cueva, y a perder eficacia en la propulsión. Un trimado correcto requiere al buceador mantener la postura en la cual su cuerpo está paralelo al suelo de la cueva. Un pasaje horizontal requerirá un trimado horizontal, mientras que un suelo en declive requerirá una adaptación del trimado. Si un buceador mantiene un trimado horizontal cuando pasa por un declive con sedimento en el suelo, la turbulencia del aleteo moverá el sedimento. La “línea de trimado” de un buceador se refiere al plano que va desde su barbilla hasta sus rodillas.

## PROPULSIÓN

Otra disciplina de vital importancia para crear movimiento debajo del agua y lograr una propulsión adecuada sin remover el sedimento es el aleteo. Varios estilos de aleteo son válidos y eficaces siempre que se realicen adecuadamente. Algunos de ellos son; la patada de rana, la patada de rana modificada, en el cual solo se usa la fuerza de los tobillos, la patada hacia atrás, la vuelta de helicóptero, la cual se utiliza para hacer giros sobre un eje y es muy útil para salir de lugares angostos, el aleteo modificado que se ejecuta manteniendo las rodillas en ángulo de 90°.

Todas estas técnicas de aleteo deben utilizar tan solo los pies, los tobillos y las rodillas dejando de lado la propulsión con las manos para recuperar el control debido a la facilidad para levantar sedimento y perder completamente la visión.

## RESPIRACIÓN

Es imperativo mantener un patrón de respiración constante cuando se practica el espeleobuceo. Un patrón inconstante de respiración tiene un impacto negativo tanto en las funciones cerebrales como en la habilidad del buceador para mantener la flotabilidad. Una respiración efectiva entraña consistencia y respiraciones medias, no exageradas ni superficiales. Una respiración muy profunda provoca drásticos cambios de flotabilidad, mientras que una respiración superficial causa una acumulación de dióxido de carbono. Un alto nivel de CO<sub>2</sub> producirá unos resultados psicológicos negativos. Por último, es importante saber que la hiperventilación es un síntoma claro de sobreesfuerzo. Si ocurre esto, el buceador debe detenerse e intentar relajarse para hasta bajar el ritmo respiratorio ya que la hiperventilación puede incrementar la narcosis, la toxicidad del oxígeno y la enfermedad descompresiva.

## CONTROL FÍSICO Y MENTAL

El espeleo-buceador deben mantener el control físico y mental durante todo el tiempo que dura la inmersión. Sin lugar a duda, si un espeleo-buceador pierde el control, él y todo el equipo están en peligro. Es por esta razón que, además del conocimiento y dominio de todas las técnicas anteriores, es necesario lograr un buen control físico y mental

El control físico se refiere a la habilidad del espeleo-buceador para mantener una buena flotabilidad, un buen trimado, una buena posición, y un buen control de la respiración durante el tiempo que dura la inmersión, mientras que el control mental se construye a partir de dos elementos claves: visualizar la inmersión, y controlar la ansiedad evitando la complacencia y manteniendo concentrada la mente en la inmersión controlando las emociones. La mayoría de las situaciones problemáticas son simples inconvenientes que se pueden solucionar; la única verdadera emergencia en una cueva es quedarse sin aire.

## TIPOS DE CONFIGURACIÓN

En el mundo del espeleobuceo hay una serie de configuraciones que podemos considerar las más comunes en las que se incluye: la configuración *backmount* o con botellas en la espalda, la configuración *sidemount* o con botellas en los laterales, equipo en las manos, y el uso de *rebreathers* o de circuito cerrado. Cada configuración tiene sus ventajas y sus inconvenientes.

La configuración *backmount* o montaje en la espalda se refiere a montar las botellas primarias de gas en la espalda. Para ello se necesita un ala o chaleco de flotabilidad. Se utilizan mucho en ambientes espaciosos y dotan al buceador de una gran cantidad de gas respirable para inmersiones profundas o de gran penetración. El montaje de las botellas en la espalda incorpora normalmente “manifolds”; que permiten acceder a la totalidad del gas a través de un solo regulador.

Por el contrario, en la configuración *sidemount* o de montaje lateral los buceadores cargan sus botellas sobre sus costados en lugar de llevarlos en la espalda. Esta configuración permite pasar a los buceadores por espacios mucho más restrictivos y angostos. Algunos de los beneficios del montaje lateral son: la capacidad de auto-rescate ante la pérdida de aire de una botella, la posibilidad de un auto chequeo de burbujas, una movilidad de las botellas más sencilla en el momento de atravesar un pasaje estrecho, un perfil más bajo para bucear por pasajes bajos y angostos, el poder entrar las botellas al agua de una en una y una estabilidad adicional en el trimado del espeleo-buceador.

La configuración con recicladores, *rebreathers* o circuitos cerrados ha aumentado mucho en los últimos años debido a la mejora tecnológica de estos dispositivos. Los circuitos cerrados no son ideales para todas las actividades de buceo en cuevas porque suman una gran complejidad al buceo y además requiere que el buceador cargue con muchas botellas adicionales por si el reciclador tiene algún fallo de suministro de gas en su unidad. Además, debemos recordar que cada buceador de circuito cerrado tiene que llevar suficiente gas en sus botellas adicionales como para permitirle salir con seguridad desde el punto de máxima penetración de la cueva sin tener que pedir aire a otro miembro del equipo (Iliffe y Bowen, 2001).

Recordamos que el *rebreather* es un sistema de respiración en el que se aprovecha el oxígeno que exhala el espeleo-buceador, el cual vuelve a introducir en el circuito de respiración. A diferencia del sistema convencional o sistema abierto donde el aire y el oxígeno se pierde, ya que se expulsa al exterior, en el reciclador los gases que se expulsan con cada respiración no se lanzan al agua, sino que son recirculados por un filtro que elimina el CO<sub>2</sub> antes de volver a ser respirados nuevamente. La mezcla respirable es reciclada una y otra vez, por eso se le denomina circuito cerrado. En cada espiración hay un 4 o 5 % de CO<sub>2</sub> que, al pasar por un cartucho depurador, normalmente cal sodada, es absorbido. De este modo, el sistema automáticamente repone ese 4 o 5 % con la mezcla de gas oportuna que extrae de una botella adicional, la cual incorpora nitrox u oxígeno según el modelo. Como solo tiene que reponer un 5 % en cada respiración el ahorro en consumo es mucho más elevado que en los sistemas de circuito abierto convencionales. Este sistema hasta la fecha ha causado cientos de muertos debido

a diferentes fallos electrónicos de las cédulas encargadas de las lecturas de CO<sub>2</sub> de la mezcla de aire existente (Vann, Pollock y Denoble, 2012).

## EQUIPO Y MATERIAL BÁSICO DE INMERSIÓN EN CUEVAS

A diferencia de cualquier otra disciplina donde el material y el equipo a utilizar depende de la casuística del momento o del lugar en el caso del buceo en cuevas ya sea para realizar un trabajo arqueológico o simplemente una inmersión recreativa hace necesario una serie de material para la minimización de riesgos. Tan importante como el conocimiento del entorno es la preparación del equipo. Esta tarea es fundamental para la seguridad tanto individual como colectiva del equipo humano que realice la actividad. En nuestro caso iremos desarrollando las necesidades técnicas particulares de la prospección arqueológica más adelante puesto que, en primer lugar, indicaremos el material esencial a tener en cuenta para desarrollar una inmersión con garantías de éxito.

### BOTELLAS

Las botellas de buceo tienen una gran variedad de tamaños, materiales, y presiones de trabajo. En espeleobuceo la elección de las botellas dependerá de las necesidades de gas y del entorno en el que se van a utilizar.

### MATERIAL

Actualmente, las botellas más frecuentes en este tipo de buceo son de aluminio puesto que suelen ser más ligeras, más baratas, más resistentes a la corrosión, y son más típicas de las regiones con cuevas poco profundas. La presión de trabajo más común para las botellas de aluminio suele ser de 207 bar /3000psi; aunque se pueden encontrar botellas de aluminio con presiones de trabajo más altas o bajas.

## GRIFERÍAS

Las griferías de las botellas se engrosan en dos categorías básicas: DIN e Internacional. Para los buceadores de cuevas, la preferida es la grifería DIN por dos razones: la junta tórica de las DIN es más grande, más fuerte y segura. El enganche de la internacional se puede dañar con más facilidad con impactos accidentales. Las DIN se pueden encontrar en las variedades de 200 y 300 bar. y están diseñadas para trabajar con botellas de una presión de trabajo correspondiente. Los reguladores DIN300 pueden trabajar con griferías de 300 y 200 bares, mientras que los reguladores DIN200 solo pueden trabajar con griferías de 200 bares de presión de trabajo.

## CONEXIONES H E Y

Las griferías H e Y tienen dos salidas para colocar dos reguladores sobre una monobotella. Utilizando un sistema H o Y, se abastece de gas a cada regulador de forma independiente, aumentando de este modo la seguridad por si alguno de ellos falla. Las griferías H se pueden conseguir con conexiones DIN o internacional mientras que las griferías Y solo se encuentran con conexiones tipo internacional.

## MANIFOLDS

Los “manifolds” son griferías especiales para conectar dos botellas, permitiendo al buceador acceder a todo el gas por medio de uno solo de los reguladores. Esta herramienta ayuda al buceador en la gestión del gas ya que no tiene que ir compensando el consumo de una botella con la otra como ocurre con el buceo lateral o *sidemount*. Los manifolds se pueden conseguir de dos tipos diferentes; con válvula de aislamiento y sin válvula de aislamiento. El que tiene válvula de aislamiento permite al buceador aislar una botella de la otra si falla un regulador, revienta un disco, se rompe una junta tórica, o una botella.

## REGULADORES

La elección del regulador por parte del buceador de cuevas debe ser basada en su seguridad, funcionamiento, y configuración. En cualquier circunstancia, una primera y una segunda etapa se tienen que montar en cada una de las botellas que se lleven. Un buceador debe de familiarizarse con la operatividad de cada regulador de los miembros del equipo ya que un día puede tener que utilizarlos.

## MANÓMETROS SUMERGIBLES

Cada botella y regulador que lleve un buceador tiene que llevar montado un manómetro sumergible a no ser que la botella vaya conectada a otra por un manifold. Es suficiente un manómetro por cada set de botellas conectadas con un manifold. Se pueden utilizar manómetros digitales; de todas formas, estos aparatos son propensos a fallar. Los analógicos son los preferidos por su sencillez y fiabilidad.

## COMPENSADORES DE FLOTABILIDAD

Cuando elegimos un compensador de flotabilidad, elegir entre el estilo, la ligereza, el material, forma, y manufactura puede ser lioso. Los factores más importantes a tener en cuenta son los siguientes; I) la simpleza y la funcionalidad son importantes (un plato, un arnés, y unas alas es un set simple y son de fácil modificación en una configuración de buceo con el equipo montado a la espalda), II) amplia capacidad para levantar peso que asegure que la capacidad que tiene será suficiente para mantener la flotabilidad del buzo, III) calidad, ya que es importante inspeccionar la calidad y manufactura del sistema, IV) la forma del sistema de compensación de flotabilidad, ya que dictará las características tanto de la capacidad para levantar peso como del coeficiente hidrodinámico a la hora de desplazarte en el agua, V) redundancia, sobre todo cuando se bucea con un traje seco, ya que puede utilizarse como sistema de flotabilidad alternativo ( con traje

húmedo, es aconsejable llevar un sistema que redunde en cuanto a vejigas para salir con seguridad aún en caso de fallo de una de ellas), y VI) libertad de movimiento del gas, ya que los espeleo-buceadores a menudo acarrean elementos que descompensan la carga. Es normal llevar estaciones laterales, u otros elementos cargados solo en un lateral. Es importante elegir un sistema de flotabilidad que permita al gas viajar de un lado a otro de tal forma que compense este peso.

## MÁSCARAS

La máscara es una de las piezas básicas en el equipo de buceo; una máscara en la que, entre agua, además de incomodidad, distraerá de ser cauteloso en la cueva. Lo más importante de una máscara es que se ajuste bien. Llevar una máscara extra es muy recomendable para todo tipo de buceo técnico.

## ALETAS

La propulsión es una de las claves en el control del buceador. Sin aletas, un buen trimado y movimiento en el agua sería imposible. Cierta tipo de aletas son mejores para la propulsión técnica utilizada por los buceadores de cuevas mientras de otras no son tan eficaces. Utilizar una aleta de tipo de pala tradicional permite a los buzos desarrollar una patada eficiente de rana modificada, patada hacia atrás, patada de aleteo modificada, y vuelta de helicóptero, pero la mayoría de los buceadores de cuevas prefieren las clásicas aletas de caucho. Los enganches de las tiras de las aletas necesitan alguna modificación. La “v” formada entre la tira y el sobrante tiende a engancharse en la línea. Esto se puede evitar uniéndolas con cinta, cambiándolas de tal modo que el sobrante de la tira quede en la parte de dentro, o cambiando las tiras por muelles.

## ELEMENTOS DE CORTE

Un espeleo-buceador tiene que llevar por lo menos dos elementos de corte. Los más comunes son: cuchillos, cutter, y tijeras. Si se elige llevar un cuchillo, debe ser compacto, afilado, y sin punta. Los cuchillos con punta tienden a producir pinchazos en el equipo si no se es extremadamente cuidadoso. Un filo serrado suele ser más eficaz al cortar la línea que uno tradicional. Algunos espeleo-buceadores optan por llevar tijeras porque cortan mejor y más variedad de materiales, incluidos los arneses, cinchas y trajes. Un cortacabos pequeño es excelente como elemento de corte de reserva. Un cortacabos bien diseñado prevendrá el corte accidental de los latiguillos y es muy fácil de estibar. Independientemente al tipo que se elija, el elemento de corte debe ser accesible con facilidad. La pantorrilla no es un buen sitio porque puede que sea muy difícil acceder a él y además es fácil que se enganche en la línea.

## LUCES

El sentido de la vista convierte los rayos de luz en impulsos nerviosos que puedan transferirse al cerebro para ser interpretados. Sin luz, no podemos ver. Las cuevas son el entorno más oscuro que hay en la tierra.

La tecnología en las luces ha recorrido un gran camino desde el comienzo del buceo en cuevas. Esos cambios se deben sobre todo al avance en las baterías y la tecnología de las lámparas. El desarrollo de los HID y de los LED ofrecen una gran cantidad de luz con baterías reducidas. En los primeros años del buceo en cuevas, los buceadores se podían sentir afortunados si contaban con una luz mediocre por equipo; hoy en día cada buceador lleva varias luces de gran calidad.

Cuando los buceadores se adentran en un entorno cerrado más allá de la zona de luz, tienen que llevar por lo menos tres luces. Una tiene que ser diseñada como luz primaria, las otras serán luces de reserva. La luz primaria puede ser alógena, HID, o LED. Las de tipo HID son las preferidas por su bajo consumo y gran luz. Algunos buceadores prefieren las alógenas por su mayor fiabilidad. Las luces de

LED están sustituyendo a las alógenas de reserva por su fiabilidad y su larga duración.

La elección de la luz primaria se debe basar en varios factores: la duración necesaria para la inmersión, la potencia deseada, el tamaño, y la fiabilidad. Las luces de reserva deben de ser pequeñas y de fácil estivación, y cada una debe de tener una potencia y duración suficiente para salir con seguridad.

## PIZARRAS Y CUADERNOS SUMERGIBLES

Las pizarras y cuadernos sumergibles sirven para llevar apuntados datos de la inmersión y para la comunicación entre los miembros del equipo. Es habitual llevar una pizarra de muñeca con los datos de las paradas de descompresión y para recordar la presión de vuelta. Los cuadernos sumergibles tienen mucho espacio para escribir, así puedes disponer de información tras la inmersión y se pueden guardar fácilmente en un bolsillo.

## ORDENADORES, TABLAS, Y TIEMPO DE FONDO

Un espelo-buceador tiene que llevar como mínimo dos aparatos para medir la profundidad y el tiempo, como dos recursos para monitorizar los tiempos de descompresión. Esto se consigue con el uso de profundímetros digitales y tablas de buceo, o puede ser conveniente la elección de ordenadores de buceo. Los ordenadores te permiten monitorizar en tiempo real el estado de la descompresión y permiten extender el tiempo de fondo y acortan las paradas de descompresión.

Los ordenadores de buceo son una herramienta esencial para el arqueólogo que pretenda trabajar en profundidades superiores a los veinte metros durante un periodo prolongado de tiempo o para aquellos que necesites realizar una descompresión por haber superado los tiempos de fondo. Los estándares de seguridad y fisiológicas del buceo obligan a estos ordenadores a controlar una serie de parámetros obligatoriamente para garantizar una buena inmersión y evitar

enfermedades descompresivas o de sobre expansión pulmonar. Algunas de ellas son;

**DIVE TIME** es la información de la duración total de nuestra inmersión.

**TIEMPO DE FONDO** dato normalmente omitido en algunos ordenadores y que calcula el tiempo del descenso más el tiempo que hemos estado en profundidad y el tiempo de ascenso.

**DEPTH/ PROFUNDIDAD ACTUAL** es una información esencial para el cálculo descompresivo llevado a cabo por el ordenador.

**PROFUNDIDAD MAXIMA** es un dato anecdótico y sin importancia a efectos del cálculo de la descompresión, aunque en ocasiones puede revelar información del área de trabajo.

**PROFUNDIDAD PROMEDIO** es el dato normalmente omitido por los ordenadores, pese a que es el más importante ya que el computador necesita de esta información para su cálculo.

**NDL/ NO DECO** es una información útil si el buzo realiza trabajos a poca profundidad o no realiza inmersiones sucesivas que le obliguen a hacer una parada de descompresión.

**TIEMPO TOTAL DE ASCENSO** no es una información relevante si el buzo modifica su profundidad, pero puede servir para calcular futuras inmersiones.

**TIEMPO HASTA LA PRIMERA PARADA** es una información que nos recuerda la importancia de esa primera parada descompresiva para la gestión del gas utilizado.

**RELOJ** es una información importante para el cálculo de los diferentes turnos de trabajo discutidos en el briefing previo a la inmersión.

**RUMBO** es un dato esencialmente para la orientación del buzo bajo el agua.

**PRESION DEL TANQUE** es una información importante para conocer el aire existente en las botellas y tanques portados.

**RANGO** es un dato que nos aporta el ordenador si realizamos un buceo convencional sin alteraciones importantes de profundidad o consumo de aire. Esta información se trata de un mero cálculo en función del tiempo de ascenso, que

puede conducir a subestimar las necesidades de gas y que además no tiene en cuenta los cambios de mezcla.

**GRAFICO DE SATURACION DE TEJIDOS** es una información poco relevante durante la inmersión, aunque nos puede servir para anotaciones en la documentación de nuestro trabajo.

**PULSOMETRO** es una información irrelevante bajo el agua, aunque hay buzos que prefieren controlar su pulso cardiaco por diferentes motivos.

**GPS** es una información importante si realizamos trabajos de prospección subacuática, aunque muchos de estos dispositivos no realizan un buen cálculo bajo el agua debido a una señal débil o inexistente en la cobertura GPS.

**OTUs** es un dato importante ya que, en inmersiones prolongadas debido a las características específicas, a la profundidad o lejanía del yacimiento o área de estudio el cuerpo del espeleo-buceador se cargará de presiones parciales de oxígeno elevadas. Hay dos límites que deben ser de obligada monitorización: el reloj del sistema nervioso central (CNS) y las unidades de toxicidad del oxígeno (OTU). Los efectos pulmonares a largo plazo limitados por las OTU causan signos o síntomas como la reducción de la capacidad vital de los pulmones y tos. Los baremos y límites de las OTU los marca la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA).

**TIEMPO DE DESATURACION TOTAL** es una información necesaria puesto que gracias a ella el buzo sabrá cuando nitrógeno disuelto en el torrente sanguíneo y en los tejidos ha desaparecido. Este dato es útil para la programación de inmersiones sucesivas y alternas en un proyecto.

**TIEMPO DE NO VUELO** es una información notoria ya que después de realizar cierto de buceo debe pasar el tiempo necesario antes de subir a un avión y así evitar la enfermedad descompresiva.

**TEMPERATURA** es un factor más a tener en cuenta cuando no se utilizan los trajes de buceo adecuados puesto que inmersiones prolongadas a bajas temperaturas pueden causar hipotermia. Esta casuística es muy normal en ciertas cuevas sumergidas de Europa debido a que éstas están alimentadas por niveles freáticos muy profundos.

HISTORIAL DE INMERSIONES es quizá la información menos relevante bajo el agua ya que no incide directamente en nuestra salud ni en nuestra condición física si anteriormente hemos respetado todos los baremos y normativa legal del buceo.

## MARCAS, FLECHAS Y COOKIES

Cada miembro del equipo tiene que llevar marcas direccionales y no direccionales. La planificación de la inmersión determina cuántas marcas se van a utilizar durante la inmersión y además hay que llevar alguna de reserva. Los tipos y usos de estas marcas se discutirán en el capítulo 10-líneas guía y en el 11-navegación compleja.

## CARRETES

Los carretes son una pieza importante de la equipación porque permiten al espeleo-buceador mantener una línea continua hasta las aguas abiertas. Cada carrete debe tener una gaza al final de la línea. La instalación de una pieza de plástico en la gaza facilita la tarea de deshacer el nudo.

## CASCOS

Una capucha ofrece algo de protección a la cabeza, pero los espeleo-buceadores necesitan una protección adicional. Los cascos ofrecen una opción tanto de protección como logística, a la hora de colocar las luces.

## EL BRIEFING

Para poder funcionar como un equipo, es necesario que cada buceador no sólo piense y actúe de forma independiente, sino que además debe tener la habilidad para reaccionar ante las necesidades de otro miembro del equipo. Cada espeleobuceador debe validar personalmente cada uno de los aspectos de una inmersión. Las transiciones en la navegación deben ser confirmadas, las líneas chequeadas, y las decisiones son de una importancia capital. Cada miembro del equipo tiene tareas específicas que se tienen que acometer durante la inmersión. Las tareas pueden incluir: mantener cómoda una línea temporal mientras se retira, proveer luz mientras otros están trabajando, instalar un salto, añadir un emplazamiento, poner una marca, etc. Estas tareas se deben asignar antes de la inmersión y cada miembro del equipo es responsable de recordarlas y desarrollarlas.

Sin duda, debemos ser prudentes a la hora de elegir a los miembros de equipo. La experiencia y habilidad de cada buceador debe marcar los objetivos de la inmersión.

Todas estas premisas deben ir acompañadas de ciertas normas de obligado cumplimiento como; el buceo en parejas, control y vigilancia del equipo personal de inmersión, control riguroso del aire y detección previa de cualquier dolencia o incapacidad física o mental que nos impida o imposibilite una inmersión con todas las garantías (Ros, 1997).

### **ANEXO III. EL CONTEXTO JURÍDICO DEL ESTUDIO ARQUEOLÓGICO EN CUEVAS SUMERGIDAS**

La realización de cualquier actividad arqueológica deberá desde un comienzo cumplir con toda la normativa vigente, partiendo desde los estándares mundiales aplicados por la UNESCO hasta los estatales y de las CCAA de cada territorio, aunque bien es cierto que las normas inferiores tienen una correlación directa con las superiores evitando duplicidades en la mayoría de los casos.

Respecto a los principios generales la aplicación de la legislación pertinente viene enumeradas por 36 normas del Anexo de la UNESCO como un conjunto coherente de “*normas concernientes a las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático*” (Maarleveld, Guérin y Egger, 2001).

Estas normas de la UNESCO recogen los diversos propósitos, enfoques, finalidades y objetivos de estas actividades, en aquellos casos en que se considera lícito intervenir de algún modo en la gestión del patrimonio, sea éste subacuático o terrestre. Entre 1998 y 2001 diferentes expertos mundiales elaboraron la Convención sobre la Protección del Patrimonio Cultural Subacuático, que fue finalmente adoptada y pasó a integrar el cuerpo de convenciones de la UNESCO dirigidas a la salvaguardia del patrimonio cultural. Los principios recogidos en la Carta del ICOMOS se incluyeron en el Anexo de la Convención. Esta Convención capacita a los Estados para proteger y conservar de forma eficaz el patrimonio cultural subacuático, al que dispensa la misma protección universal que se dispensa al patrimonio cultural terrestre

Las políticas de gestión del patrimonio suelen asociarse al patrimonio terrestre, pero la gestión del patrimonio responde a principios generales que son válidos para cualquier clase de patrimonio cultural, independientemente de su ubicación. Como hemos mencionado anteriormente, muchos estados cuentan desde hace tiempo con políticas y reglamentaciones para la protección y la gestión del patrimonio inmueble y arqueológico, lo cual se ha traducido en un consenso generalizado sobre el valor del patrimonio y la prevención de su abuso. Las Normas del Anexo se corresponden con este consenso y se rigen por estos principios mundialmente aceptados. De todas las normas mencionaremos las de

obligamiento cumplimiento para la casuística específica de nuestra investigación, las cavidades sumergidas (Maarleveld, Guérin y Egger, 2001). Estas son;

La Norma 1. *“La conservación in situ será considerada la opción prioritaria para proteger el patrimonio cultural subacuático. En consecuencia, las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático se autorizarán únicamente si se realizan de una manera compatible con su protección y, a reserva de esa condición, podrán autorizarse cuando constituyan una contribución significativa a la protección, el conocimiento o el realce de ese patrimonio”*.

La segunda parte de la Norma 1 establece que *“las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático se autorizarán...”* y recalca dos puntos esenciales. Por un lado, implica que la entidad encargada de autorizar las actividades debe tener tan presente la opción prioritaria como la entidad que las lleve a cabo. Cualquier actividad prevista debe contar con la autorización de las autoridades competentes establecidas según el Artículo 22 de la Convención. Esta alusión, bien clara, sitúa las actividades dirigidas a yacimientos arqueológicos subacuáticos en la esfera del dominio público.

La parte final de la Norma 1 estipula que las actividades *“podrán autorizarse cuando constituyan una contribución significativa a la protección, el conocimiento o el realce de ese patrimonio.”* Hoy se acepta que la excavación debe evitarse a menos que responda a una buena razón, pero este principio crucial no era tan evidente cuando la arqueología inició su andadura hace un siglo o dos.

La Norma 4 nos dice que *“las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático deberán servirse de técnicas y métodos de exploración no destructivos, que deberán preferirse a la recuperación de objetos. Si para llevar a cabo estudios científicos o proteger de modo definitivo el patrimonio cultural subacuático fuese necesario realizar operaciones de extracción o recuperación, las técnicas y los métodos empleados deberán ser lo menos dañinos posible y contribuir a la preservación de los vestigios”*.

Esta Norma 4 subraya el principio recogido en la Norma 1. Al igual que la Norma 3, establece que *“las actividades no deben afectar a un yacimiento más de lo que*

*sea necesario y que el objetivo prioritario es conservar y proteger todo el patrimonio en la medida de lo posible”.*

La Norma 5 dice que *“las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático evitarán perturbar innecesariamente los restos humanos o los sitios venerados”* como es el caso de los yacimientos arqueológicos encontrados en los cenotes mexicanos, los cuales albergan yacimientos arqueológicos sumergidos de gran variedad, desde enigmáticos altares de sacrificio mayas a asentamientos prehistóricos. Por ejemplo, en el Cenote Calaveras del yacimiento arqueológico de Tulum, en el estado de Quintana Roo, se han descubierto 118 calaveras y otros huesos de origen maya diseminados por el fondo de la cueva, a 15 metros de profundidad. Los restos humanos pueden ser parte integral de un yacimiento de patrimonio cultural subacuático. Aunque a veces son de gran interés científico, el equipo de investigación debe tratarlos siempre con el debido respeto y evitar perturbarlos innecesariamente.

La Norma 6, nos señala que *“las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático se reglamentarán estrictamente para que se registre debidamente la información cultural, histórica y arqueológica”*. Si la actividad no se registra no quedará constancia alguna de la alteración o perjuicio causado al yacimiento, por bienintencionada que haya sido la actividad, y aquello que ha sido destruido no podrá ser objeto de futuros estudios. Para evitar que esto ocurra las actividades dirigidas al patrimonio cultural subacuático deben reglamentarse estrictamente.

Las Normas 7 y 8 postulan que por regla general *“el patrimonio se debe compartir. Hoy día la exclusividad del patrimonio cultural es inaceptable”* (Maarleveld, Guérin y Egger, 2001).

Por otro lado, y tal como comentábamos en un principio se deberá acatar también la normativa estatal, autonómica y en ocasiones local respectiva para cumplir con todos los requisitos legales necesarios. Dentro de este marco, la regulación del patrimonio arqueológico en general, y del subacuático en particular, se articula de acuerdo con el criterio de reparto competencial que establece la Constitución Española y que concreta la Ley 16/1985, de 25 de junio, del Patrimonio Histórico Español, en su artículo 6, criterio ratificado por el Tribunal Constitucional en la Sentencia 17/1991.

Con carácter general, corresponde a las Comunidades Autónomas las competencias ejecutivas para aplicar la ley en materia de patrimonio arqueológico (declaración de Bien de Interés Cultural, BIC, inclusión en el Inventario, autorizaciones administrativas de excavaciones o prospecciones, tasar el precio en el hallazgo casual para el premio, etc.). Las Administraciones Autonómicas tienen, por tanto, un papel protagonista en la protección del patrimonio arqueológico, tanto terrestre como subacuático (Ministerio de Cultura, 2009; Ministerio de Educación, 2015). En nuestro caso, y como veremos más adelante, nuestra investigación se registrará por los parámetros marcados por las autoridades de patrimonio autonómicas, concretamente por el Decreto 14/2011, de 25 de febrero, por el cual se aprueba el Reglamento de intervenciones arqueológicas y paleontológicas de las Illes Balears. La Consejería de Educación y Cultura, a través de la Dirección General de Cultura, ejerce la competencia normativa y ejecutiva atribuida por el Estatuto de Autonomía y el resto del ordenamiento jurídico en materia de patrimonio histórico (artículos 1 y 2.5.g del Decreto 10/2010, de 9 de marzo, por el que se establecen las competencias y la estructura orgánica básica de las consejerías de la Administración de la Comunidad Autónoma de las Illes Balears) (Departamento de Cultura de las Islas Baleares, 2011).

## EL CONTEXTO JURÍDICO DEL BUCEO EN CUEVAS SUMERGIDAS

En nuestro país el buceo técnico está catalogado como buceo recreativo y debe seguir la legislación pertinente reflejada en el Real Decreto 550/2020, de 2 de junio, por el que se determinan las condiciones de seguridad de las actividades de buceo (Ministerio de Transportes, 2020). En el Artículo 2 de la norma describe el espacio confinado sumergido como, cualquier espacio o ambiente en el cual solo hay un punto de entrada y de salida por el cual dos buceadores no podrían pasar a la vez. Este espacio confinado podrá ser, entre otros, una cueva o un pecio. Por otro lado, en el Capítulo 3, Artículo 18.1 b, donde regula la modalidad de buceo recreativo en técnica de autónomo, define que; “*no estará permitida la entrada en grutas, cuevas, interior de barcos hundidos o cualquier tipo de inmersiones que*

*se desarrollen bajo techo, sea real o virtual, en las que se pierda la luz y cuya profundidad de penetración tenga más de 30 metros”. De este modo, debemos guiarnos por el Artículo 18. 2. Donde se indica que; “el equipamiento mínimo para la práctica del buceo recreativo en técnica de autónomo estará constituido por los elementos que se detallan en el apartado 1.1 del anexo III”.*

Así el Anexo III nos detalla que necesitamos para poder realizar un buceo recreativo en ambientes confinados; 1.1 Equipamiento mínimo para la práctica de la modalidad de buceo recreativo en técnica de autónomo dentro de los límites prescritos del Artículo 18.1:

- a) Dispositivo de compensación de flotabilidad.*
- b) Gafas o máscara facial de buceo.*
- c) Aletas.*
- d) Suministro de gas con dos segundas etapas.*
- e) Dispositivo de control de presión del suministro de gas.*
- f) Dispositivo de corte.*
- g) Dispositivo de control de profundidad.*
- h) Dispositivo de control de tiempo.*
- i) Dispositivo o tablas para la gestión de la descompresión.*
- j) Dispositivo acústico de superficie.*
- k) Dispositivo de balizamiento en superficie.*

Además, según el Artículo 18.3 nos detalla que; “*la práctica de la modalidad de buceo recreativo en técnica buceo autónomo fuera de los límites de profundidad y de mezcla de gases señalados en el apartado 1, solo podrá ser realizada por mayores de 18 años, disponiendo para ello del equipamiento mínimo que se detalla en el apartado 1.2 del anexo III*”.

Así, el equipamiento mínimo para la práctica de buceo recreativo en técnica de autónomo fuera de los límites prescritos en el artículo 18.1:

- a) *Dispositivo de compensación de flotabilidad. En inmersiones realizadas con mezclas de gases con helio se utilizarán dispositivo de compensación de flotabilidad adicionales.*
- b) *Dos gafas o máscara facial de buceo.*
- c) *Aletas.*
- d) *Dos suministros de gas con reguladores independientes o un Rebreather.*
- e) *Dispositivo de control de presión de los suministros de gases.*
- f) *Dos dispositivos de control de tiempo.*
- g) *Dos dispositivos de control de profundidad.*
- h) *Dos dispositivos para la gestión de la descompresión.*
- i) *Dos dispositivos de iluminación.*
- j) *Carrete y cabo guía adecuado para la inmersión en entornos cerrado.*
- k) *Dispositivo de corte.*
- l) *Boya de descompresión, en inmersiones con descompresión.*
- m) *Dispositivo de balizamiento en superficie.*
- n) *Disponer de oxígeno normobárico para el tratamiento en el lugar de la inmersión.*

Por último, y siguiendo las instrucciones de la norma en su Capítulo III Artículo 18.4. “*Todo practicante de la modalidad de buceo recreativo deberá encontrarse en posesión de un seguro de accidentes y de responsabilidad civil, que pueda cubrir cualquier tipo de incidente o accidente, que pueda producirse durante el desarrollo de estas*”. Es aquí, tal como hemos mencionado en el Anexo II, donde surge la necesidad de una certificación de buceo por parte de las compañías de seguro, las cuales piden como requisito esencial tener una cualificación adecuada para el buceo en ambientes confinados. Es por ello por lo que muchas escuelas de buceo técnico ofrecen cursos de distintas certificadoras como Professional Association of Diving Instructors (PADI), International Association of Nitrox Divers (IANTD), National Association for Cave Diving (NACD), National Speleological Society Cave Diving Section (NSS\_CDS), National Association of Underwater Instructors (NAUI), Federación Española de Actividades

Subacuáticas (FEDAS), Technical Diving Internacional (TDI), Global Underwater Explorer (GUE), etc.

	GUE	IANTD	NACD	NSS-CDS	NAUI	PADI	TDI	FEDAS
Año de inicio de actividades	1998	1985	1969	1973	1960	1966	1994	1967
Penetraciones con luz natural hasta -40m		Cavernas	Cavernas	Cavernas	Instrucción específica	Cavernas	Cavernas	Grutas submarinas (en desarrollo)
Penetraciones con mono hasta los límites del aire	Cueva 1	Introducción a cuevas	Introducción a cuevas		Cuevas		Introducción a cuevas	
Penetraciones programadas y limitadas a la autonomía de un bimotores. Sólo navegación				Aprendiz de cuevas	Instrucción específica			
Penetración limitada a la naturaleza del gas. Bimotores. Máximo -45m	Cueva 2	Cuevas	Cuevas	Cuevas	Instrucción específica		Cuevas	Buceador grutas submarinas avanzado (en desarrollo)
Uso de torpedos, botellas de etapas, laterales, etc.	Cueva 3	Cuevas avanzado	Cursos de especialidad	Cursos de especialidad	Instrucción específica			Instructor grutas submarinas (en desarrollo)

Tabla donde aparece una comparativa de los diferentes títulos buceo en cuevas (BUEX, 2002).

## EL CONTEXTO JURÍDICO DEL BUCEO CON AIRE EN ESPAÑA

Hasta hace poco la normativa a seguir era todavía la Orden de 14 de octubre de 1997, del Ministerio de Fomento, por el que se aprueban las Normas de Seguridad para el ejercicio de Actividades Subacuáticas (Ministerio de Fomento, 1997). Pero esta orden en el año 2017 sufrió una modificación importante, la cual quedó reflejada en la Resolución de 2 de febrero de 2017, de la Dirección General de la Marina Mercante, por la que se actualizan determinados preceptos relacionados con las tablas de descompresión de las normas de seguridad para el ejercicio de actividades subacuáticas, aprobadas por la Orden de 14 de octubre de 1997.

Desde su creación en la década de los setenta, el Centro de Buceo de la Armada, como institución de referencia, ha actuado como centro de formación de buceadores, centro logístico de operaciones y ha servido como centro de investigación subacuática.

La promulgación de la Doctrina de Buceo de la Armada (D-BC-01), representa el resultado de la continua búsqueda y validación empírica de la calidad técnica, en la física y fisiología del buceo, en las operaciones de buceo y en la investigación de las tablas de descompresión.

La Tabla I nos da el tiempo máximo que podemos permanecer en el fondo a una profundidad dada para ascender a superficie sin paradas de descompresión. Esta tabla también nos proporciona los grupos de inmersión sucesiva, al finalizar la inmersión sin descompresión. Incluso aunque no tengamos que realizar paradas de descompresión durante el ascenso, el buceador tiene en superficie una cantidad de nitrógeno residual en sus tejidos. Este Nitrógeno Residual se tendrá en cuenta a la hora de planear otra inmersión (Ministerio de Transportes, 2013).

Profundidad máxima (mca)	Tiempo límite sin DECO (min)	GRUPOS DE INMERSIÓN SUCESIVA															
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Z
3	ilimitado	57	101	158	245	426	*										
4,5	ilimitado	36	60	88	121	163	217	297	449	*							
6	ilimitado	26	43	61	82	106	133	165	205	256	330	461	*				
7,5	1102	20	33	47	62	78	97	117	140	166	198	236	285	354	469	992	1102
9	371	17	27	38	50	62	76	91	107	125	145	167	193	223	260	307	371
10,5	232	14	23	32	42	52	63	74	87	100	115	131	148	168	190	215	232
12	163	12	20	27	36	44	53	63	73	84	95	108	121	135	151	163	
13,5	125	11	17	24	31	39	46	55	63	72	82	92	102	114	125		
15	92	9	15	21	28	34	41	48	56	63	71	80	89	92			
16,5	74	8	14	19	25	31	37	43	50	56	63	71	74				
18	63	7	12	17	22	28	33	39	45	51	57	63					
21	48	6	10	14	19	23	28	32	37	42	47	48					
24	39	5	9	12	16	20	24	28	32	36	39						
27	33	4	7	11	14	17	21	24	28	31	33						
30	25	4	6	9	12	15	18	21	25								
33	20	3	6	8	11	14	16	19	20								
36	15	3	5	7	10	12	15										
39	12	2	4	6	9	11	12										
42	10	2	4	6	8	10											
45	8		3	5	7	8											
48	7		3	5	6	7											
51	6			4	6												
54	6			4	5	6											
57	5			3	5												

Tabla donde aparecen los tiempos límite en una inmersión sin parada de descompresión y los grupos a seguir en una inmersión sucesiva. Fuente; (Ministerio de Transportes, 2013).

Si el buceador excede el tiempo en el fondo tabulado en la Tabla I, entonces es necesario calcular las paradas de descompresión usando la Tabla III (Ministerio de Transportes, 2013).

**9B06 Tabla II. Tiempos de Nitrógeno Residual (TNR) para inmersiones sucesivas con aire**

Busque el Grupo de inmersión sucesiva de la inmersión previa del buceador en la línea diagonal sobre la tabla. Entre horizontalmente a partir de esa letra hasta encontrar el intervalo de tiempo real pasado en superficie por el buceador.

Desde ese recuadro lea hacia abajo para encontrar el nuevo grupo al final del IS. Continúe hacia abajo siguiendo la columna hasta profundidad de la inmersión sucesiva. El tiempo expresado en la intersección es el tiempo de nitrógeno residual (TNR), expresado en minutos, que ha de ser computado en la inmersión sucesiva.

\* Las inmersiones cuyos IS superen estos períodos no se consideran inmersiones sucesivas. Emplear tiempos reales en el fondo de la Tabla de Aire para tales inmersiones.

Inmers. Prof.	Grupo de inmersión sucesiva al comienzo del IS													Grupo de inmersión sucesiva al final del IS																	
	Z	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	Z	O	N	M	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B
3	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	427	246	159	101	58										
4,5	**	**	**	**	**	**	**	**	**	450	298	218	164	122	89	61	37														
6	**	**	**	**	**	462	331	257	206	166	134	106	83	62	44	27															
7,5	†	†	470	354	286	237	198	167	141	118	98	79	63	48	34	21															
9	372	308	261	224	194	168	146	126	108	92	77	63	51	39	28	18															
10,5	245	216	191	169	149	132	116	101	88	75	64	53	43	33	24	15															
12	188	169	152	136	122	109	97	85	74	64	55	45	37	29	21	13															
13,5	154	140	127	115	104	93	83	73	64	56	48	40	32	25	18	12															
15	131	120	109	99	90	81	73	65	57	49	42	35	29	23	17	11															
16,5	114	105	96	88	80	72	65	58	51	44	38	32	26	20	15	10															
18	101	93	86	79	72	65	58	52	46	40	35	29	24	19	14	9															
21	83	77	71	65	59	54	49	44	39	34	29	25	20	16	12	8															
24	70	65	60	55	51	46	42	38	33	29	25	22	18	14	10	7															
27	61	57	52	48	44	41	37	33	29	26	22	19	16	12	9	6															
30	54	50	47	43	40	36	33	30	26	23	20	17	14	11	8	5															
33	48	45	42	39	36	33	30	27	24	21	18	16	13	10	8	5															
36	44	41	38	35	32	30	27	24	22	19	17	14	12	9	7	5															
39	40	37	35	32	30	27	25	22	20	18	15	13	11	9	6	4															
42	37	34	32	30	27	25	23	21	19	16	14	12	10	8	6	4															
45	34	32	30	28	26	23	21	19	17	15	13	11	9	8	6	4															
48	32	30	28	26	24	22	20	18	16	14	13	11	9	7	5	4															
51	30	28	26	24	22	21	19	17	15	14	12	10	8	7	5	3															
54	28	26	25	23	21	19	18	16	14	13	11	10	8	6	5	3															
57	26	25	23	22	20	18	17	15	14	12	11	9	8	6	5	3															

TNR (Minutos)

\*\* El Tiempo de Nitrógeno Residual no puede determinarse usando ésta tabla (ver art. 0941.h, i para indicaciones).  
 † Leer verticalmente hacia abajo hasta los 9 mca de profundidad de la inmersión sucesiva. Emplear los tiempos de nitrógeno residual para calcular el tiempo de la inmersión sencilla equivalente. Descomprimir empleando la tabla aire de 9 mca de profundidad.

Tabla donde aparece los tiempos de nitrógenos residual para inmersiones sucesivas con aire. Fuente; (Ministerio de Transportes, 2013).

Dependiendo de la CCAA la legislación autonómica cambia. Por ejemplo, en las Islas Baleares la jurisprudencia a seguir es la del Decreto 14/2014, de 14 de marzo, por el que se establecen los principios generales en materia de buceo recreativo en la comunidad autónoma de les Illes Balears. BOIB núm. 36, de 15/03/2014.

