

Memoria de esta actividad desarrollada en el año 2018. Enuncia los motivos y objetivos de la misma. Describe sus preparativos, actividades y circunstancias. Incluye sus cálculos técnicos, conclusiones y resultados. Asimismo, recoge cualquier extremo que hemos podido considerar de interés o importancia para su documentación.

Proyecto Yuri

Actividad divulgativa y científica que surge de la colaboración entre el departamento de física y química del IES Valle del Saja y de la Delegación Territorial de Aemet en Cantabria, Textil Santanderina, Meteorológica y la Consejería de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de Cantabria.

Covadonga Gutiérrez
Alberto Aguayo
Carlos Fernández




departamento de física y química I.E.S. VALLE DEL SAJA



AEMet
Agencia Estatal de Meteorología



METEOROLOGICA



AUTORES DEL DOCUMENTAL Y LA MEMORIA:

Covadonga Gutiérrez García

Alberto Aguayo Díaz

Carlos Fernández Freire



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2020

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<https://cpage.mpr.gob.es>

NIPO: 666-20-017-8
<https://doi.org/10.31978/666-20-017-8>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>



@Aemet_Esp



<https://www.facebook.com/AgenciaEstataldeMeteorologia>



Agradecimientos

En la realización de este proyecto ha colaborado una gran diversidad de personas e instituciones. La naturaleza de cada aportación también es muy variada: desde el imprescindible y valioso soporte económico hasta la asesoría técnica, pasando por la prestación del esfuerzo, los conocimientos o los elementos que han sido útiles o necesarios en cada etapa.

El orden en el que adjuntamos este listado de personas y de instituciones (públicas y privadas), responde más a una estructura formal que a una jerarquía de nuestro agradecimiento. Para nosotros, todas y cada una de las contribuciones han sido preciosas y enriquecedoras. No es exagerado decir que convierten el resultado del proyecto en un fruto compartido del que todas las partes han de sentirse, en cierta forma, responsables. La mera transferencia de conocimiento, experiencia e información entre ellas, ha supuesto un enorme valor añadido que justifica buena parte del esfuerzo.

Los autores del Proyecto Yuri

CONSEJERÍA EDUCACIÓN, CULTURA Y DEPORTE DEL GOBIERNO DE CANTABRIA (Dirección General de Innovación y Centros educativos)

Miriam González

Balbina García (Asesora área Ciencias)

EXCELENTÍSIMO AYUNTAMIENTO DE VILLADA (PALENCIA)

Alfredo Milano (Teniente Alcalde)

IES VALLE DEL SAJA (Cabezón de la Sal)

IES MANUEL GUTIÉRREZ ARAGÓN (Viérmoles)

TEXTIL SANTANDERINA

Juan Parés (Consejero delegado)

José Antonio Mazorra (Director de compras)

METEOLÓGICA

Rafael Borén (Presidente)

DELEGACIÓN DE AEMET EN CANTABRIA (Apoyo técnico y cesión de materiales)

José Luis Arteche García (Delegado AEMET Cantabria)

Manuel Llana Martínez

Antonio Cano de los Santos

Ana María Alonso de la Fuente

Mara Garvía Polo

Julián J. Santamaría Sancho (Delegación Aemet en Madrid)



RUIDO INTERNO: ARTES ESCÉNICAS Y VISUALES (Dirección y montaje audiovisual)

Juan Carlos Fernández Izquierdo

Mamen Campo

Álvaro Fernández Campo

PRAXAIR ESPAÑA SL, SANTANDER (Suministro de helio)

Carlos Calderón (Técnico comercial)

RICARDO GÓMEZ (Programación, electrónica, tratamiento de datos)

MENCHU MADRAZO (Selección musical)

SEGUNDO POLANCO (Modelización y volumetría del globo)

DAVID AGUAYO (Tablas, gráficas y tratamiento de datos)

ÓSCAR MANTECA (Cesión de Material e instrumentación)

IVANA DIEGO GUTIÉRREZ (Cesión de Material e instrumentación)

ALFREDO GARCÍA Y ÓSCAR HIERRO (Recuperación globo y equipos)

DEPARTAMENTO DE COORDINACIÓN OPERATIVA DEL ESPACIO
AÉREO- ENAIRE

RESTAURANTE LA CUCHARA DEL CAMESA en Olea (Cesión de espacios
para filmación)

Luis Prieto (Propietario)



Resumen/abstract

La presente memoria recoge el Proyecto Yuri. Se trata de un documento comprensivo, que incluye todos los extremos de la experiencia: sus objetivos y principios, su planificación, su desarrollo, sus resultados y sus conclusiones. También todos aquellos cálculos y tareas que han sido necesarios para llevarla a cabo.

De forma sintética, el proyecto utiliza la realización de un lanzamiento de un globo con equipos de grabación y medida de variables físicas a la estratosfera, como medio de consecución de diversos objetivos generales relacionados con la aplicación del método científico por parte de alumnos y de otros objetivos específicos, como la obtención de datos, gráficas y registros audiovisuales durante el lanzamiento.

Cronológicamente, abarca desde el comienzo de los preparativos en la primavera de 2018, hasta la culminación del lanzamiento el 10 de agosto de ese año y aún después, durante la laboriosa extracción de datos y elaboración de documentos (textos, gráficos y audiovisuales), que registran cada extremo del proyecto.

De forma paralela, la experiencia se ha plasmado en un documental que ilustra el proceso en su conjunto: preparativos, ejecución del lanzamiento y extracción de conclusiones.

This report comprises the Yuri Project. It is a comprehensive document that includes every aspect of the experience: its objectives and principles, its planning, development, results and conclusions. It also contains every calculation and task needed to carry it out.

Synthetically, this Project uses the launching of a balloon with recording and measuring equipment to the stratosphere, as a mean to achieve several general goals related to the application of scientific methodology by the students and other specific ones like getting data, graphics and audio and video records during the launching.

In chronological order, it covers from the beginning of the preparations in the spring of 2018, to the launching in august 10th and furthermore, to the laborious extraction of data and preparation of the documentation (texts, graphics and audiovisual aids) that make a record of every aspect of the Project.

At the same time, the experience has been captured in a documentary that shows the whole process: the preparations, the realization of the launching and the extraction of conclusions.



Contenido

Agradecimientos	3
Resumen/abstract	5
Contenido	6
Lista de tablas.....	10
Lista de figuras.....	11
Introducción	14
Los autores y la justificación del proyecto.....	14
Contexto científico y técnico.....	16
La atmósfera terrestre.....	16
Aerostatos.....	16
Tratamiento formal del movimiento de un globo en la atmósfera	17
Antecedentes	18
Meteotek08.....	18
Proyecto Nearspace	18
Otros proyectos	19
Objetivos	20
Objetivos generales	20
Objetivos específicos	20
Comentario sobre los objetivos	21
Planificación del Proyecto.....	22
Planteamiento y alcance de la experiencia.....	22
NEEB	22
El trabajo en equipo.....	22
El papel del <i>experto</i>	23
Los recursos y el tiempo.....	23
La documentación de la experiencia	24
Descripción de la actividad	25
Diagrama de flujo de la actividad	25
Cronograma.....	27
Etapas	28
Plantear la experiencia y formar el equipo inicial.....	28
Registrar tareas e incidencias	28
Hacer diseño preliminar y definir el alcance de la actividad.....	29
Buscar colaboración, alumnos y recursos	29



Colaboraciones establecidas y sus características	29
Instrucción inicial de los alumnos	30
Elaborar la memoria justificativa	33
Elaborar el presupuesto	33
Preparar la actividad: Realización de cálculos y desarrollo de los materiales	34
Flujos de información y datos durante el proyecto	37
Preparar la actividad: Realizar ensayos.....	38
Construcción de la caja portadora de los instrumentos	40
Preparación y programación de los componentes electrónicos	43
Determinación de la fuerza ascensional del globo, estimación de la presión ejercida por el látex en el interior y comprobación de la esfericidad del globo.....	49
Pruebas a baja temperatura.....	50
Pruebas con el sensor de presión de un teléfono móvil inteligente.....	52
Comprobación de la masa total.....	53
Comprobación de la estabilidad de la grabación durante el vuelo.....	54
Funcionamiento de los sensores de presión y temperatura.....	54
Recepción de coordenadas GPS.....	55
Desarrollar la actividad: Lanzar globo y módulo.....	56
Preparación previa al lanzamiento	56
Tareas previas al lanzamiento	57
Lanzamiento del globo.....	62
Desarrollar la actividad: Seguir y buscar el equipo de grabación	64
Recuperar la información.....	67
Ejecutar Plan de contingencia	70
Imposibilidad de recuperación del equipo.....	70
Imposibilidad de recuperación de los datos e información	70
Editar el vídeo y archivar la información.....	71
Edición del vídeo.....	71
Archivo de la información generada	71
Redactar la Memoria de la actividad.....	73
Presentar y promover el proyecto.....	74
ANEXO I: La atmósfera terrestre	76
La atmósfera estándar.....	76
ANEXO II: Aerostatos	80
ANEXO III: Tratamiento formal del movimiento de un globo en la atmósfera	82



ANEXO IV: Sobre el coeficiente aerodinámico	86
ANEXO V: Derivaciones sobre las fórmulas barométricas	88
ANEXO VI: Deducción del tiempo de ascenso de un globo en la atmósfera.....	90
ANEXO VII: Presupuesto del Proyecto.....	91
ANEXO VIII: Cálculos durante la sesión en la DT Aemet en Cantabria.	93
ANEXO IX: Determinación del lugar del lanzamiento	97
ANEXO X: Elección de fechas probables y solicitud de permisos.....	99
ANEXO XI: Elección de la fecha de lanzamiento	102
ANEXO XII: Cálculo de la trayectoria probable	107
Niveles de referencia.....	108
Tiempos de vuelo	109
Estimación de la hora del lanzamiento.....	110
Estima del desplazamiento horizontal del conjunto globo/equipos	112
Trazado de las trayectorias previstas.....	116
ANEXO XIII: Datos recogidos y análisis de los mismos	118
Análisis de los datos.....	122
ANEXO XIV: Consideraciones sobre los cálculos mediante simulación.....	140
ANEXO XV: Obtención de evidencias sobre la esfericidad de la Tierra	146
ANEXO XVI: Programación electrónica, recogida de datos mediante placa Arduino.....	149
Controlador	149
Almacenaje de datos	150
Barómetro y termómetro interior	151
Termómetro exterior	152
Software	153
Código.....	154
Conclusiones	156
Conclusiones de enfoque científico.....	157
Conclusiones de enfoque técnico	159
Conclusiones derivadas de la construcción y disposición de los equipos e instrumentos.	159
Conclusiones derivadas de las imágenes grabadas.....	160
Conclusiones derivadas de los ensayos realizados.....	162
Conclusiones derivadas de la ejecución del lanzamiento.....	163
Conclusiones de enfoque educativo	164
Conveniencia de la promoción de valores cívicos	164
Importancia de la participación e implicación práctica de los alumnos	165



Consideraciones sobre la dimensión educativa del proyecto	165
Valores añadidos de índole educativa	166
BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES CONSULTADOS.....	167



Lista de tablas

Tabla 1. Cronograma de la actividad	27
Tabla 2. Valores medidos durante la sesión en la DT Aemet en Cantabria	49
Tabla 3. Listado de materiales necesarios para ejecutar el lanzamiento.	56
Tabla 4. Impreso de registro de tareas durante el lanzamiento.	58
Tabla 5. Datos horarios de tiempo de vuelo.....	68
Tabla 6. Atmósfera estándar. Valores para capas inferiores. Fuente ISO.	78
Tabla 7. Presupuesto del proyecto.....	92
Tabla 8. Valores normales de horas de sol.....	99
Tabla 9. Niveles de referencia y altitudes en metros.....	108
Tabla 10. Tiempos de vuelo estimados	109
Tabla 11. Rumbo del globo a diferentes niveles	112
Tabla 12. Apartamientos e incrementos de longitud y latitud para el pronóstico de las 09:00 UTC del día 10 de agosto de 2019	115
Tabla 13. Puntos de trayectoria prevista para cada pronóstico	116
Tabla 14. Datos de P, T y posición del globo.....	119
Tabla 15. Tiempo, presión y altitud derivados de las fórmulas barométricas a partir de los datos del lanzamiento	124
Tabla 16. Comparativa de diferentes métodos de medida de altitud.....	126
Tabla 17. Velocidad con respecto a la altitud.	129
Tabla 18. Velocidad horizontal y dirección según la altitud.	137



Lista de figuras

Ilustración 1. Globo meteorológico de látex en proceso de carga de helio. Fuente: Aemet.	17
Ilustración 2. Flujograma de la experiencia Proyecto Yuri.....	26
Ilustración 3. Ermita de la Virgen del Río en Villada (Palencia).....	36
Ilustración 4. Diagrama de flujos de datos e información durante el Proyecto Yuri.	37
Ilustración 5. Estructura de Porexpan del módulo.	40
Ilustración 6. Manta térmica y caja recubierta	41
Ilustración 7. Caja portadora y palos de sujección.	42
Ilustración 8. Módulo con etiquetas identificadoras	42
Ilustración 9. Extensión de batería suplementaria.....	44
Ilustración 10. Disposición de calentadores (en rojo) y de extensión de batería (en azul) dentro de la caja.....	44
Ilustración 11. Tarjeta de memoria de vídeo.....	45
Ilustración 12. GPS Spot Gen3. Fuente:Spot Gen3 TM.....	47
Ilustración 13. Detalle de las posiciones recogidas por la aplicación de Spot Gen3.....	48
Ilustración 14. Colocación de los dispositivos de localización en la caja el día del lanzamiento.....	48
Ilustración 15. Medida del perímetro del globo	49
Ilustración 16. Medida de la fuerza ascensional.....	50
Ilustración 17. Medida de la presión interior del globo	50
Ilustración 18. Disposición de los elementos dentro de caja durante los ensayos.....	51
Ilustración 19. Pruebas con CO2 y con Nitrógeno líquido.....	52
Ilustración 20. Cuba de inmersión de los equipos en Nitrógeno líquido.....	52
Ilustración 21. Baro-transmisores de la Oficina Meteorológica del Aeropuerto de Santander ...	53
Ilustración 22. Medidas efectuadas con el sensor de presión en condiciones próximas al vacío, dentro y fuera de la caja.	53
Ilustración 23. Medida de la masa de la carga útil que lleva el globo.....	54
Ilustración 24. Caída libre del sistema "carga útil + paracaídas" que irá suspendido del globo .	54
Ilustración 25. Sensores de presión y temperatura en condiciones próximas al vacío.	55
Ilustración 26. Recepción de las coordenadas de posición y localización del dispositivo GPS..	55
Ilustración 27. Llenado y control de diámetro del globo de látex.	57
Ilustración 28. Caja portadora con los dispositivos que llevará el globo con la placa Arduino..	60
Ilustración 29. Caja con la totalidad de los dispositivos.	60
Ilustración 30. Sellado de la caja portadora.	61
Ilustración 31. Colocación superior e inferior de los dispositivos de localización.	61
Ilustración 32. Anclaje de la caja portadora al conjunto paracaídas/globo.	62
Ilustración 33. Comprobación del sellado de la caja y del anclaje del globo.....	62
Ilustración 34. Momento del lanzamiento del globo.	63
Ilustración 35. Visualización de trayectorias a partir de la señales emitidas por los SPOT GEN3.	65
Ilustración 36. Trazado del vuelo completo en 2D a partir de las señales de localización de los dispositivos GPS.	65
Ilustración 37. Recuperación de la caja portadora con los equipos de grabación, recuperación y medida.	67
Ilustración 38. Evolución de la Presión en el Aeropuerto de Santander entre 2000 y 2019. Fuente: Aemet, 2019	76
Ilustración 39. Relación entre presión y altitud. Fuente: OACI.....	77



Ilustración 40. Perfiles de temperatura para la altitud en niveles inferiores de la atmósfera ISA. Fuente: The Comet Program	78
Ilustración 41. Diagrama del sondeo del Observatorio de Santander de las 12 UTC del día 1 de agosto de 2019. Fuente: Aemet	79
Ilustración 42. Cobertura mundial de observaciones aerológicas. Fuente: ECMWF.....	80
Ilustración 43. Radio-sonda y Conjunto Globo/paracaídas/radiosonda. Fuente: Aemet.....	81
Ilustración 44. Variación del coeficiente aerodinámico con el número de Reynolds	87
Ilustración 45. Imagen que muestra el alejamiento de la esfericidad del globo durante la sesión en Aemet.	95
Ilustración 46. Sección de la fracción de un esferoide representativo de la forma del globo, trazado mediante el programa Geogebra.....	95
Ilustración 47. Visualización orográfica de Cantabria y su entorno. Fuente: Gobierno de Cantabria (mapas.cantabria.es)	97
Ilustración 48. Servidumbres aéreas en la mitad norte de España. Fuente: Enaire	98
Ilustración 49. Coordenadas del punto de Lanzamiento en Villada. Fuente: SIGPAC.....	98
Ilustración 50. Solicitud de permiso de actividad en Espacio Aéreo	101
Ilustración 51. Autorización de Enaire para la actividad.	101
Ilustración 52. Pronóstico de 300 hPa del día 5 de agosto a las 00UTC, para las 06UTC del día 9 de agosto. Fuente: ECMWF y tiempo.com	102
Ilustración 53. Situación a 500 hPa para las 06UTC del día 9 de agosto. Fuente: GFS de la NOAA	103
Ilustración 54. Situación en 300 hPa a las 06UTC del día 10 de agosto	104
Ilustración 55. Pronóstico GFS a 500 hPa para las 06UTC del día 10. Fuente: NOAA	104
Ilustración 56. Captura del pronóstico de Aemet para Villada del día 5 de agosto de 2018.....	105
Ilustración 57. Captura de simulación de la trayectoria para el lanzamiento a las 07:30 UTC del día 10. Fuente: Universidad de Cambridge	106
Ilustración 58. Comparación de salidas de modelo GFS de viento a 300 hPa para el 10 de agosto de 2019.....	111
Ilustración 59. Incrementos de latitud y longitud en navegación loxodrómica.....	113
Ilustración 60. Relación entre Apartamiento e incremento de Longitud.....	114
Ilustración 61. Trayectoria real y trayectorias estimadas para las 09 y las 12 UTC del módulo Yuri	117
Ilustración 62. Vista 2D del ascenso del globo	120
Ilustración 63. Vista en 2D del descenso del globo.	121
Ilustración 64. Evolución de la presión durante el tiempo de vuelo	121
Ilustración 65. Comparación de la evolución de la temperatura en el ascenso y el descenso frente a los valores teóricos.	127
Ilustración 66. Presión frente a altitud con las dos curvas teóricas, lineal e isoterma.....	128
Ilustración 67. Velocidad de ascenso frente a la altitud.	130
Ilustración 68. Velocidades de subida y bajada referidas a la altitud.....	131
Ilustración 69. Tiempo de ascenso/altitud.....	134
Ilustración 70. Datos de posicionamiento del Spot-gen	135
Ilustración 71. Estimación del simulador Nearspace para el lanzamiento	142
Ilustración 72. Simulador de High Altitude Science.....	143
Ilustración 73. Simulador de Habhub.....	144
Ilustración 74. Predictor de trayectoria de vuelo de Habhub.org.	144
Ilustración 75. Depresión del horizonte. (Fuente: Elaboración propia)	146



Ilustración 76. Alcance visual. (Fuente: elaboración propia).....	147
Ilustración 77. Captura de imagen a 10.000 metros aproximadamente.	147
Ilustración 78. Imagen captada a 15.000 metros aproximadamente.	148
Ilustración 79. Imagen capturada a 20.000 metros aproximadamente.	148
Ilustración 80. Imágenes HRVIS del Meteosat a las 08:00 UTC del día 10 de agosto de 2018. Fuente: Aemet y weather.us	148
Ilustración 81. Placa Arduino uno rev3.....	150
Ilustración 82. Placa Sparkfun MicroSD Shield	150
Ilustración 83. Sensor de presión	151
Ilustración 84. Esquema de comunicación según protocolo estándar I2C	151
Ilustración 85. Sensor exterior de temperatura.....	152
Ilustración 86. Esquema de integración del sensor de temperatura.....	152
Ilustración 87. Protección y recubrimiento del sensor de temperatura.	153
Ilustración 88. Componentes (sensores, placa y batería) conectados.....	153
Ilustración 89. Curvatura terrestre a los 20.000 metros	161
Ilustración 90. Horizonte terrestre a baja altitud.	161
Ilustración 91. Indicios del color negro en el espacio exterior.....	162



Introducción

Los autores y la justificación del proyecto

La actividad divulgativa y el desarrollo de material audiovisual con aplicación docente no son nuevos para el Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja. La trascendencia de estos trabajos va más allá de su presencia en las redes sociales o en internet a través de su página web¹. Su popularidad en el ámbito académico se ha visto refrendada por sendos premios nacionales otorgados por las Reales Sociedades Españolas de Física y de Química, basados en su valor en la promoción del conocimiento y la inquietud científica en entornos rurales.

Una visita a esta página, permite apreciar la potencia comunicativa que tienen estas experiencias para abordar aspectos de la realidad científica, para despertar el interés y la curiosidad por la ciencia y para motivar a los alumnos en la toma de contacto y aprendizaje de una gran variedad de disciplinas.

Bajo esta filosofía, basada en la participación, en la recreación retrospectiva o no de eventos de relevancia física y en la documentación audiovisual de las actividades, se ha llevado a cabo una nueva iniciativa que nos aproxima a los límites verticales de la actividad humana; que nos permite entender algo mejor el entorno en el que nos desenvolvemos y las condiciones que son necesarias para hacerlo. En este sentido, la mera descripción del experimento no es suficiente para inferir y comprender su alcance y su amplitud. Por eso, quizá es conveniente anticipar ciertas reflexiones.

Una idea fundamental sobre la que se sustenta un proyecto como éste es que no hace falta ser nadie en particular para aspirar al conocimiento. Las ganas de saber y de entender son universales, legítimas, potentes, y contagiosas. Por eso es que triunfan desde hace años los programas de divulgación y la sociedad entiende como suyo cualquier avance o progreso.

De forma que detrás, a su lado o delante de los que arrancan el proyecto, ha participado un grupo de gente que tiene en común la inquietud por conocer una respuesta y que se ha dejado seducir por la realización de una tarea. En su etapa embrionaria, parte de la iniciativa de dos profesores del Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja en Cabezón de la Sal, Covadonga Gutiérrez y Alberto Aguayo, y de un profesional de la Agencia Estatal de Meteorología, Carlos Fernández. Más tarde, y en la medida en que la posibilidad o el interés se lo han permitido, se han ido agregando otros componentes que han aportado sus ideas, recursos o trabajo.

En gran parte, la justificación de este proyecto se puede buscar en la propia implicación en el mismo de los alumnos participantes. Como mencionaremos, su aproximación al trabajo en equipo, al pensamiento científico y a la realidad de la investigación, ha resultado una fuente de gran satisfacción y un acicate muy poderoso para el trabajo de todos. Desde el primer momento han colaborado y se han comprometido compartiendo su tiempo, su conocimiento y su talento.

¹ www.fqsaja.com



En cuanto a la pura descripción de la experiencia objeto del proyecto, nos hemos propuesto enviar una cámara hasta la estratosfera, superando los 20.000 metros, que recoja imágenes de la superficie terrestre. La idea ha sido, sencillamente, tratar de asignar a las imágenes obtenidas durante el ascenso las condiciones medidas por algunos equipos meteorológicos. De forma añadida, tratamos de captar visualmente la curvatura de la superficie de la Tierra, para lo cual resulta imprescindible alcanzar la altitud mencionada.

Dada la realidad tecnológica a la que tenemos acceso, desde etapas muy tempranas del proyecto se hizo evidente la necesidad de recuperar el equipo fotográfico y los datos grabados.

Mucho más allá de la utilidad del experimento, se presentaron grandes retos técnicos que hubo que ir superando y que nos darían muchas ocasiones para ejercitar nuestras habilidades, superar nuestras limitaciones y desarrollar nuestra capacidad de buscar soluciones para superarlas.

La condición que nos impusimos desde un primer momento, fue el respeto a la filosofía que inspira cualquier trabajo científico. Esto ha implicado no sólo justificar adecuadamente cualquier decisión en base a informaciones y estudios verificables, sino también explorar alternativas diversas y documentar escrupulosamente todo el proceso desde su inicio.

Además, otro de los frutos de la actividad lo ha constituido la realización y producción de un vídeo que refleja de forma dinámica y panorámica, no sólo la secuencia de los trabajos, sino otros procesos que, posiblemente, tienen más que ver con su concepción y con tareas de apoyo al mismo.



Contexto científico y técnico

Sin el propósito de dar a esta memoria una dimensión excesiva, sí hemos considerado interesante incluir una serie de apuntes que enmarcan la experiencia y que se desarrollan algo más prolijamente en los anexos de este documento. Sobre todos ellos, se ha instruido a los alumnos en las etapas previas e iniciales del proyecto, adaptando los contenidos a su nivel académico y posibilitando su plena participación y aprovechamiento de la experiencia.

La atmósfera terrestre

El entorno atmosférico en el cual se va a desenvolver nuestro equipo corresponde a las capas iniciales de la atmósfera: troposfera y primeros kilómetros de la estratosfera. Sus particulares características físicas condicionan en enorme medida el desarrollo de las tareas. Por esta razón, es crucial que las entendamos y estudiemos en qué manera pueden interferir en los objetivos a alcanzar o determinar los medios que utilizemos para ello.

Una breve aproximación técnica se adjunta en el [Anexo I](#).

Aerostatos

Un aerostato es una aeronave que se sirve del principio de Arquímedes para volar; para ello va provista de algún recipiente lleno de un gas menos denso que el aire y que, no tratándose de un globo cautivo, puede mantenerse a flote en el aire circundante y elevarse hasta cierta altitud en la atmósfera.

Un tipo de aerostatos son los denominados “globos aerostáticos”, los cuales incluyen a los “aerostatos de gas”; estos están inflados con gases como el hidrógeno o el helio. Son conocidos también con la denominación “charlière”, en honor a su inventor, el científico francés Jacques Charles, que en agosto de 1783 llevó a cabo el primer lanzamiento de un ingenio de este tipo desde París.

Una de las aplicaciones que los aerostatos de gas tienen en la actualidad es la investigación, por ejemplo, en meteorología. En nuestra experiencia, utilizaremos un globo meteorológico como elemento propulsor que nos permita alcanzar altas cotas en la atmósfera. Por ello, es necesario detenerse en su estudio, comprender su funcionamiento y acometer los cálculos adecuados para conseguir nuestros fines mediante su uso.

El detalle y extensión de dichos cálculos, se incluyen en el [Anexo II](#) y sucesivos de esta memoria.



Ilustración 1. Globo meteorológico de látex en proceso de carga de helio. Fuente: Aemet.

Tratamiento formal del movimiento de un globo en la atmósfera

Las particulares características de nuestro elemento propulsor, determinan la forma en que nuestros equipos realizarán el ascenso en la atmósfera. Existe una aproximación física a la misma que nos puede permitir conocer importantes elementos que nos permitirán tomar decisiones basadas en datos y cálculos fundamentados.

En esta experiencia, se propone una modelización física de la evolución de un aerostato en la atmósfera que nos puede proporcionar, entre otras cosas:

- Datos importantes como velocidades de ascenso y, por lo tanto, tiempo de vuelo, altitud máxima, etc.
- Un punto de partida para poder calcular la trayectoria de los equipos y poder recuperar la información.
- Una comprensión de los procesos físicos que se dan en la atmósfera.

El detalle técnico de este enfoque se adjunta en el [Anexo III](#) de esta memoria.



Antecedentes

Para valorar el alcance del proyecto, es imprescindible saber en qué medida constituye una iniciativa novedosa o si aporta alguna perspectiva distinta a las de otras anteriores. De cualquier forma, cada experiencia en este tema se ha de analizar y ponderar en base a sus circunstancias y en sus momentos.

Es posible también que, aunque inicialmente pueda parecerlo, dos proyectos similares difieran en los objetivos o enfoques. Tampoco los puntos de partida, tanto económicos como formativos han de ser idénticos.

De cualquier forma, nos ha sido obligado estudiar de qué forma se han acometido experiencias similares. En muchos de nuestros pasos, hemos analizado las soluciones elegidas anteriormente por otros. En ocasiones las hemos descartado por inasequibles, por obsoletas o poco convenientes a nuestros fines. Algunas de las opciones previamente utilizadas han quedado superadas técnicamente en apenas unos años y a costes perfectamente asumibles.

Sin embargo, en no pocas veces hemos tratado de encontrar mejores alternativas a metodologías ya usadas sin dar con ellas. En esos casos, hemos asumido sin problemas el bagaje heredado. Unos y otros casos se detallan en el capítulo de Desarrollo del proyecto.

En este apartado nos limitaremos a describir brevemente dos de los más significativos, tanto por su ambición como por consistencia científica o técnica.

Meteotek08

Proyecto realizado por profesores y alumnos del IES Bisbal, en Girona, en el año 2008. Su objetivo era análogo al de nuestro proyecto: obtener imágenes fotográficas de la tierra desde una altitud de unos 30.000 metros. (Bisbal, 2008)

Utilizaron como elemento propulsor un globo meteorológico similar, aunque considerablemente mayor al propuesto por nosotros, pero sus soluciones técnicas de captura de imágenes y de localización fueron diferentes. Utilizaron una cámara Nikon Coolpix L10 para tomar las instantáneas con un servomotor controlado electrónicamente. Para conseguir ese control implementaron un sistema programado informáticamente por ellos mismos que consiguió ejecutar las tareas con gran eficiencia. Tanto de toma de datos de temperatura y presión como de control de la cámara y sistema de localización.

Consiguieron sus propósitos con éxito, hecho que tuvo una merecidísima repercusión nacional e internacional, dada la ambición, la modestia y la seriedad de los recursos utilizados.

En nuestro caso, al asumir como reto el condicionante del peso de nuestro equipo, se hacía imposible adoptar gran parte de las soluciones que habían elegido. Sin embargo, un buen número de ideas sobre el correcto aislamiento y configuración física de los elementos nos resultó de gran ayuda. Su corrección en el planteamiento metodológico nos ha servido en cierta forma de inspiración y de referente.

Proyecto Nearspace

Programa científico de la exploración de la estratosfera, que posibilita el envío de globos meteorológicos a altos niveles de la atmósfera con propósitos a medida de los



participantes. (Nearspace, 2011) Se viene desarrollando desde 2011 y promueve en el ámbito de la educación secundaria la realización de experiencias con muy diversos fines, desde comprobar la cobertura de los móviles a realizar lanzamientos a muy larga distancia.

Aunque utilizan medios técnicos fuera de nuestro alcance, sí nos resulta interesante y aplicable la filosofía de participación e implicación de los alumnos no universitarios en los procesos de investigación y ciencia.

Otros proyectos

Se han realizado gran número de experiencias similares, en este (Extremadura, 2017) y otros países, que reproducen alguno de los aspectos de este proyecto. Algunos de ellos, a pesar de no partir de un enfoque dirigido a alumnos de ESO o bachiller sino a enseñanzas profesionales o universitarias, han facilitado información que ha sido útil en uno u otro momento.

Por nuestra parte, más que perseguir soluciones de complejidad técnica a nuestros problemas, hemos tratado de sentar fundamentos científicos compatibles con los conocimientos de los alumnos y tratar de conseguir nuestros objetivos de forma sencilla sin renunciar en ningún momento a la metodología de cualquier proceso de investigación o de desarrollo. Como detallamos en el apartado “Objetivos”, una de nuestras intenciones era mostrar y demostrar a los alumnos que es posible hacer ciencia con medios modestos o limitados y que es necesario documentar correctamente el desarrollo de un experimento para poder analizar y compartir sus resultados.



Objetivos

Objetivos generales

Fruto de la afinidad y buena comunicación entre el equipo y que constituía el punto de partida de este proyecto, sería posible enumerar una gran cantidad de objetivos que, de forma general, considerábamos alcanzar. Los que creemos fundamentales e incluimos en esta memoria son los siguientes:

- Despertar el espíritu científico y estimular en todos los participantes, no sólo de los alumnos, el pensamiento crítico; mostrando la importancia de aplicar la lógica y el método en los procesos de aprendizaje y de experimentación.
- Realizar trabajo cooperativo y comprender sus beneficios. Tanto en el orden de la eficacia como en el del aprendizaje y el desarrollo.
- Adquirir y asimilar empíricamente conceptos y destrezas diversas, relativas a campos muy diferentes pero relacionados a través de la experiencia; entendiendo la transversalidad de la mayoría de las actividades que son desarrolladas por los seres humanos.
- Aprender a buscar soluciones, alternativas y resultados utilizando la creatividad y manejando recursos nuevos.
- Valorar la importancia de compartir las experiencias científicas, para contribuir a la difusión del conocimiento, entendiendo y apreciando el beneficio social que esto supone.

Objetivos específicos

Para conseguir estos objetivos, y encontrando intereses e interrogantes comunes, se decidió tratar de conseguir los siguientes objetivos específicos:

- Lanzar un globo aerológico hasta una altitud superior a los 20.000 metros, con los medios accesibles de acuerdo al presupuesto con el que se ha contado.
- Obtener imágenes desde la alta atmósfera que nos permitieran, por un lado, constatar la curvatura terrestre. Por otro lado, apreciar la pérdida de difusión de la luz en entornos superiores a la tropopausa y que nos permitan apreciar el color negro del espacio exterior.
- Asignar altitudes a las diferentes imágenes obtenidas, utilizando equipos de medida de presión y temperatura.
- Caracterizar las condiciones de presión y temperatura durante el transcurso de la experiencia y constatar, de esa forma, las condiciones físicas de la atmósfera.
- Visualizar la negritud de la estratosfera.
- Comprobar la esfericidad de la Tierra.
- Modelizar el movimiento del globo y contrastarlo con la física de la ascensión en la troposfera y en la estratosfera, así como con los modelos que permiten analizar el cambio en la esfericidad del globo.
- Elaborar un documental que recoja el desarrollo y el espíritu, no sólo del lanzamiento objeto del proyecto, sino también de todas las vicisitudes y preparativos del mismo, así como de algunas de las conclusiones extraídas.



Comentario sobre los objetivos

Como hemos dicho en la introducción, una conclusión importante que se extrajo desde etapas muy tempranas, a partir de los recursos previstos y experiencias previamente realizadas como las apuntadas más arriba, fue la de la necesidad de recuperar los equipos de medida del lanzamiento. Resultaba económicamente inviable utilizar medios que nos permitieran recuperar las imágenes de forma remota. No se ha considerado esta circunstancia como un lastre, sino como la oportunidad de agudizar el ingenio y la creatividad y de explorar nuevas opciones.

La repercusión de este hecho se tradujo en dos cuestiones fundamentales:

- La necesidad de incorporar medios de localización solventes que nos permitieran recuperar los equipos.
- El incremento de carga útil que esto suponía para nuestro lanzamiento y la necesidad de tenerla en cuenta en nuestros cálculos.

Conjuntamente con los alumnos, hemos considerado necesario realizar una serie de cálculos y trabajos que permitieran dar sustento científico y técnico a nuestra toma de decisiones y conclusiones, las detallamos a continuación:

- Estimar los valores para la masa de helio y la del lastre atado al globo, además de su diámetro, con la finalidad de que éste alcance la estratosfera antes de su rotura.
- Usar simuladores con los que determinar la altura teórica a alcanzar por el globo, utilizando los datos de la masa total del sistema y el diámetro del globo.
- Determinar teóricamente los valores del tiempo y la velocidad del vuelo del globo, así como de la altura de dicho vuelo, y contrastarlos con los valores obtenidos en el vuelo real.
- Aplicar el software matemático GeoGebra para el trazado de la forma que adopta el globo con el lastre atado a él, así como para el cálculo de su volumen.
- Utilizar placas Arduino para el control y funcionamiento de sensores que midan las magnitudes presión y temperatura.



Planificación del Proyecto

Planteamiento y alcance de la experiencia

No existe una lista cerrada de principios y criterios que hayan regido este proyecto, pero sí creemos interesante relacionar algunos de los más significativos.

NEEB

Hemos aplicado la que, en adelante, llamaremos doctrina NEEB (Ningún Esfuerzo Es Baldío) a cada una de las etapas que describiremos. Mucho más allá del objetivo concreto, la experiencia nos confirma que es generalmente en el camino en donde hallaremos la parte mollar del conocimiento. Hemos afrontado cada tarea, cada paso, con espíritu aventurero y disfrutando del esfuerzo que supone superar un reto. Es el proceso de encontrar respuestas y hallar soluciones el que aporta la satisfacción. Probablemente mucha más que la consecución del objetivo.

Mientras, hemos ido descubriendo preguntas y posibles respuestas allí donde no pensábamos que pudieran darse. Todo ha sido experiencia. Todo ha sido ciencia.

El trabajo en equipo

No tiene sentido ignorar tus límites y tratar de asumir íntegramente todos los problemas y empeños. La práctica totalidad de los avances científicos y técnicos lo han sido merced al trabajo en equipo y no a individuos aislados. Existen los genios, sí. Pero aun considerando esto, ¿De dónde partió su interés y su apetito intelectual? ¿Quién jugó un papel en su instrucción o entrenamiento? ¿Qué recursos utilizaron hasta llegar a consagrarse como tales?

La respuesta es siempre la misma: Todos nuestros méritos son siempre también méritos ajenos.

En algún momento de la formación se enseña que la ciencia es “un proceso acumulativo de experiencia y conocimiento”². Sin desmerecer los aportes de nadie, es importante no olvidar el punto de partida y la deuda que supone ser un ser social.

Una lección transversal a extraer de este concepto es la relativa a la *eficiencia*. Trabajar en equipo es más eficiente puesto que, normalmente, reduce los tiempos empleados y multiplica las capacidades.

En este proyecto, todos estos conceptos tienen una expresión concreta. Es perfectamente claro que los trabajos entre diferentes grupos, o en diferentes etapas del desarrollo, son una pieza fundamental para el conjunto restante. Por ser más concreto en este aspecto, y adelantando algo del detalle que se puede ver de forma extendida en la memoria, podemos ver con claridad que la bondad y honestidad de los cálculos en los ensayos iniciales para determinar masas y volúmenes del conjunto de equipos son imprescindibles para la modelización posterior del ascenso de los mismos. A su vez, esta modelización da como

² Es muy posible que la cita no sea exactamente esa, pero así lo dejamos porque se ajusta de forma muy conveniente a lo que queremos expresar.



fruto datos sobre la velocidad de ascenso y los períodos de vuelo, cuya calidad es clave para poder estimar la evolución y la deriva del globo y facilitar su recuperación.

Esta secuencia, tan importante en este proyecto, ilustra muy bien la relevancia de promover el trabajo en equipo como principio, estimulando la actitud correcta y ponderando el valor del mismo.

El papel del *experto*

En muchos momentos sabemos lo que queremos, pero no tenemos idea de la forma de obtenerlo. O, con igual frecuencia, creemos tener controlados los efectos de lo que estamos haciendo y nos sorprenden consecuencias indeseadas que ponen en peligro nuestro éxito³. Para evitar esto, resulta fundamental recurrir al *experto*.

En cada paso de este proyecto y, de acuerdo con las intenciones declaradas en la memoria justificativa del mismo, hemos recurrido a las instituciones o personas que han resultado accesibles y que nos han aportado soluciones y respuestas que, o bien estaban fuera de nuestro alcance o se ajustaban de mejor manera a nuestros objetivos.

Los recursos y el tiempo

De un equipo inicial, núcleo original del proyecto, partió el diseño de la actividad y sobre él se volcaron todas las motivaciones y preguntas cuya respuesta necesitábamos encontrar. Sin embargo, cabía esperar que fueran necesarios recursos que no era posible cubrir a expensas de los voluntariosos participantes.

El primer paso, obviamente, fue estimar los recursos necesarios. Ha de quedar clara la literalidad del verbo estimar. Es decir, “suponemos a priori” que necesitamos cierta cantidad y naturaleza de recursos. Por supuesto, el cálculo es incierto. Sin embargo, casi con seguridad será un cálculo inferior al que sobre la marcha se vaya revelando. A eso ya llegaremos.

La herramienta inicial y fundamental para contar con los recursos presupuestados es la “colaboración”. De forma conjunta y abierta, nos planteamos la siguiente cuestión:

¿Pueden existir intereses comunes entre el proyecto y alguna entidad o institución? Una etapa primordial es la de buscar esas conexiones. A menudo no son obvias y descubrirlas requiere una dosis de creatividad e imaginación. En realidad, esta parte del proceso consistió en extender la idea del “trabajo en equipo” más allá del núcleo inicial de participantes. En este caso, las entidades o instituciones colaboradoras prestarían recursos y compartirían frutos y objetivos.

Además, el propio hallazgo de esta coincidencia de intereses con otras instituciones resultó una justificación añadida y una fuente de motivación adicional.⁴

³ Aunque ya abundaremos en lo que debemos o no debemos considerar éxito. Recordemos NEEB.

⁴ En el apartado “Etapas”, se hace referencia concreta a colaboraciones suscritas y su naturaleza.



A partir de cierto punto, y con una cantidad más o menos fija de recursos humanos, físicos, económicos y administrativos, sólo nos quedó jugar con el único recurso con el que podíamos manejarnos con cierta libertad: el tiempo.

En este sentido, podríamos dilatar el proceso de forma razonable para adecuarlo a nuestras posibilidades. Dentro de la descripción de la actividad, fijamos un plazo de arranque y establecimos, eso sí, una secuencia en las tareas.

La documentación de la experiencia

Siempre resulta interesante y, dado el caso, muy útil, conservar de alguna forma el registro de tareas, participantes, recursos utilizados, conclusiones extraídas y, en un sentido más amplio, cualquier idea surgida a desarrollar en el futuro. Este proceso de documentación forma, en realidad, parte del proceso científico; está normalizado e integrado en las enseñanzas técnicas⁵. Es la manera de compartir nuestro conocimiento y de cumplir con la premisa que mencionamos según la cual la ciencia es un proceso acumulativo de saber.

Desde el inicio, hemos documentado la experiencia porque, fuera cual fuera el resultado, trataríamos de darle la forma adecuada para poder compartirlo.

Por un lado, hemos mantenido al día un registro de eventos, reuniones, experiencias y reflexiones. Con todo ello, conseguimos conservar coherencia y orden en las tareas.

Por otro lado, cuando ha finalizado la experiencia, para recoger todos sus extremos, hemos podido atenernos al formato de memoria proyecto disponible que más se ha amoldado a nuestra conveniencia.

⁵ TFG, TFM, Tesis y, en general, cualquier publicación científica.



Descripción de la actividad

Dentro de la propia memoria justificativa inicial, se incluyó una descripción detallada de la experiencia, de igual forma que se habían plasmado los objetivos generales y específicos de la misma. Para ello, se recurrió a metodologías técnicas de uso muy común, que sistematizan esta etapa y facilitan y hacen más sencilla su comprensión.

Diagrama de flujo de la actividad

El proyecto es un proceso y, como tal, lo representamos mediante el siguiente flujograma⁶.

En la estructura formal de flujograma que se muestra, se esquematizó la secuencia de tareas ordenadas por columnas según el objeto de las acciones desempeñadas. Generalmente, cada columna corresponde a equipos o personas, para asignar los trabajos según su área de actividad. En nuestro caso y dadas las circunstancias, ya en los primeros contactos entre el equipo quedó clara la permeabilidad de las funciones, por lo que no se definieron cometidos excluyentes. No se trató de asignar responsabilidades firmes y limitadas, sino de encontrar idoneidades y posibles recursos colaborativos.

⁶ Tratamos de trazar un flujograma conforme a las normas habituales en la gestión por “enfoque basado en procesos”, común en prácticamente todos los sistemas de gestión utilizados.

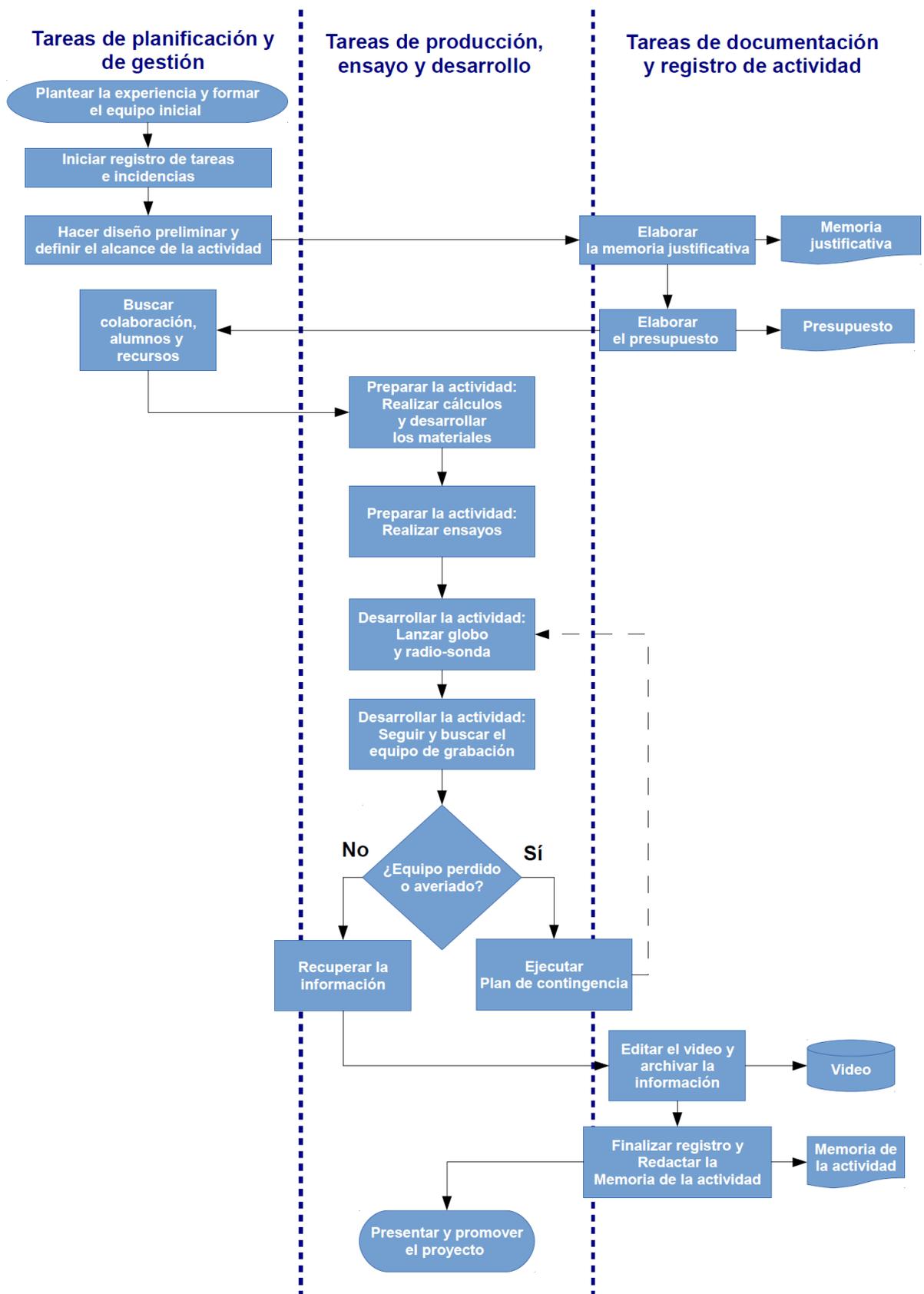


Ilustración 2. Flujograma de la experiencia Proyecto Yuri



Cronograma

Para enmarcar temporalmente el proyecto, se elaboró un cronograma esquemático de cada una de las acciones y los períodos previstos de ejecución.

Año 2018

Tabla 1. Cronograma de la actividad

Actividades	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre
Plantear la experiencia y formar el equipo inicial									
Iniciar registro de tareas e incidencias									
Hacer diseño preliminar y definir el alcance de la actividad									
Buscar colaboración, alumnos y recursos									
Elaborar la memoria justificativa									
Elaborar el presupuesto									
Preparar la actividad: Realizar cálculos y desarrollar los materiales									
Preparar la actividad: Realizar ensayos									
Desarrollar la actividad: Lanzar globo y radio-sonda									
Desarrollar la actividad: Seguir y buscar el equipo de grabación									
Recuperar la información									
Ejecutar Plan de contingencia									
Editar el vídeo y archivar la información									
Redactar la Memoria de la actividad									
Presentar y promover el proyecto									



Etapas

En este apartado se describirán las etapas del proyecto, que básicamente se han cubierto de acuerdo con la planificación.

Por ello, hemos tratado de conservar los nombres de cada epígrafe para que se correspondan con los descritos en el flujograma de la actividad.

Plantear la experiencia y formar el equipo inicial

En los primeros contactos realizados entre el equipo inicial⁷, comienza un proceso dinámico que va dando forma no sólo a las capacidades con las que se cuenta o se tiene previsto contar, sino al propio objetivo de la experiencia. Se ajustan las expectativas evitando una ambición excesiva que vicie la planificación y malogre el proyecto.

Se constatan afinidades, intereses compartidos y se proponen opciones que enriquecen y transforman el proyecto. En definitiva, se percibe la viabilidad de la experiencia.

Como puntos que recogen el espíritu y filosofía del proyecto:

- Una actividad colaborativa con participación de alumnos. Enfocada a despertar su curiosidad e interés y, por extensión, la de aquellos con los que se comparta el fruto de la experiencia.
- Posibilidad de expandir o descartar los objetivos a medida que se vaya progresando en las tareas. Planteamiento dinámico y abierto de la actividad.
- Conservación de la impronta divulgadora de anteriores proyectos audiovisuales. El tono y factura que ha inspirado otros trabajos del departamento se debe mantener y el resultado ha de ser consecuente con ellos.

Registrar tareas e incidencias

Desde el momento en que comienzan a hacerse reuniones, intercambios de opiniones, búsquedas de información o primeros contactos con colaboradores, ha sido necesario llevar un registro adecuado de cada evento o incidencia. De esta forma, no sólo se plasma de forma objetiva lo decidido o realizado, sino que se conserva sin distorsión un relato de lo acontecido.

⁷ El 9 de abril de 2018, se reúnen los tres miembros iniciales del Proyecto Yuri, en una reunión en la que se tratan los siguientes puntos del orden del día:

1. Análisis de los aspectos más generales del proyecto
2. Colaboración de la Agencia Estatal de Meteorología
3. Patrocinio de la empresa Textil Santanderina S.A.
4. Reparto de funciones y tareas
5. Participación e implicación de estudiantes en el proyecto
6. Materiales y recursos
7. Documentación y grabación
8. Datos, información y documentos de referencia
9. Ecuaciones y cálculos previos
10. Ensayos
11. Presentación y promoción



Hacer diseño preliminar y definir el alcance de la actividad

En esta etapa se ha dado forma al proyecto en los términos en los que lo hemos descrito anteriormente. Se consideró lo más eficaz y realista enfocar la actividad al entorno conocido y recurrir a fuentes cercanas y asequibles.

El conocimiento de experiencias previas similares, forma parte del conocimiento científico y, naturalmente, del progreso tecnológico. Su comprensión y análisis permiten anticipar posibles obstáculos y adoptar soluciones de resultados contrastados. Hemos de tener en cuenta también que la evolución técnica es constante y que hemos de procurar avanzar con ella, para no repetir meramente lo ya realizado y poder obtener unos mejores resultados.

La descripción gráfica anteriormente expuesta⁸, es fruto de esta etapa del proyecto. Además, definió el marco de las siguientes etapas a afrontar:

- Por un lado, nos adelantó de forma general los recursos que íbamos a necesitar y nos dio una idea muy aproximada de los plazos con los que podíamos contar.
- Nos dio una idea de las necesidades de colaboración, fueran imprescindibles o meramente convenientes.

Buscar colaboración, alumnos y recursos

A la hora de redactar la memoria justificativa inicial, ya se habían establecido diversas vías y posibles canales de comunicación. A partir de los mismos, quedaron definidas las siguientes cuestiones:

- Los profesores del departamento de física y química, se encargaron de seleccionar y proponer los alumnos que han considerado para la participación en el proyecto.
- Se buscó también la participación de entidades y personas conectadas de muy diversa manera al equipo del proyecto, que pudieran aportar su experiencia en aspectos concretos. Es el caso de la Agencia Estatal de Meteorología o de profesionales muy especializados en la meteorología o la producción de medios audiovisuales como la productora Ruido Interno.
- También se buscó la colaboración de organizaciones y empresas, algunas de gran implantación comarcal, que habitualmente prestan su apoyo a iniciativas que revierten en la comunidad educativa de muy diversas maneras, o que tienen una gran conexión con algunos aspectos del proyecto: tecnología, servicios, meteorología, etc.

Colaboraciones establecidas y sus características

Incluimos en este apartado, de forma explícita, algunas de las colaboraciones que se han establecido durante el proyecto. El orden seguido en su presentación, responde a la secuencia cronológica de las mismas.

⁸ Flujograma



- La mencionada Agencia Estatal de Meteorología, prestó su colaboración durante la etapa de cálculos y sesiones de prueba del globo propulsor, facilitando formación y asesoría al respecto. También proporcionó los futuros elementos utilizados durante el lanzamiento definitivo. Ha resultado, asimismo, una fuente de gran valor y autoridad para realizar estimaciones de trayectoria y para familiarizarnos con el entorno atmosférico en el que se desarrollará el experimento.
- La empresa Textil Santanderina, es una entidad que ha colaborado ya en otras ocasiones con el departamento de Física y Química del I.E.S. Valle del Saja. Está firmemente comprometida con las iniciativas de promoción científica en la comarca en la que se asienta y apoya decididamente proyectos educativos que conectan la ciencia y la tecnología con la industria. Su colaboración se ha sustentado en forma de una valiosa contribución económica para la compra de equipo y material imprescindible para la realización de la actividad.
- La empresa Meteorológica es un proveedor de servicios meteorológicos de alto nivel, enfocada al sector industrial y energético. Tiene gran experiencia en la aplicación de nuevas tecnologías en el campo de la meteorología. En este proyecto, ha contribuido económicamente ampliando en una gran medida las posibilidades y perspectivas a la hora de adquirir la tecnología necesaria para conseguir nuestro objetivo.
- La Consejería de Educación, Cultura y Deporte del Gobierno de Cantabria, ha contribuido con una parte de la financiación necesaria para el desarrollo del proyecto.

Para la documentación audiovisual de la experiencia se opta por la contratación de los servicios de una reconocida productora de artes escénicas y audiovisuales: Ruido interno⁹.

Instrucción inicial de los alumnos

Para un mayor aprovechamiento de la experiencia y poder favorecerse del trabajo en equipo es necesario realizar una mínima instrucción previa de los alumnos participantes. Ésta se puede vertebrar en torno a las siguientes líneas de actuación:

- Presentar el proyecto con todos sus objetivos y una temporalización aproximada. Se debe establecer un pequeño calendario de trabajo para que el alumno valore su capacidad de implicación en el proyecto. Una experiencia tan multidisciplinar como esta permite establecer objetivos más abiertos, hasta conformar un escenario de trabajo que, con toda seguridad, acabará abordando asuntos no previstos en las propuestas iniciales.
- Poner en conocimiento de los alumnos las experiencias que existen al respecto. Tanto a nivel nacional como internacional. Para ello reciben, mediante una lista de correo creada para la ocasión, los correspondientes enlaces web a las que están descritas con precisión. En el panorama nacional se les remite al trabajo realizado por un grupo de estudiantes de un Centro de Cataluña en 2008 denominado

⁹ El 11 de abril de 2018, Juan Carlos Fernández, de dicha productora y también profesional de la educación, nos confirma su entusiasta y comprometida participación en el proyecto, asumiendo todos los extremos del mismo.



Meteotek08 ampliamente documentado y con una extensa memoria que sirve como una excelente guía de referencia.

- Conocer con cierta profundidad tanto la constitución de la atmósfera como las leyes del movimiento de un globo en un fluido son, sin duda, los dos trabajos que más atención requieren antes de pasar a la fase de ejecución.
- En una primera sesión el técnico de AEMET realiza una presentación sobre la constitución y características de la atmósfera terrestre. Desde un primer momento, y como tema transversal, se incide en la fragilidad de la biosfera y en la necesidad de políticas de respeto y preservación de los recursos del planeta.
- Posteriormente se procede a presentar el desarrollo formal del movimiento de un globo en el seno de la atmósfera. Se determinan los tiempos de ascenso del globo, la velocidad en función de la altitud y la altitud como función de la presión. Los principios implicados son conocidos por cualquier alumno de modalidad científica de 4º de ESO, a saber, principio de Arquímedes, ecuación fundamental de la hidrostática o ecuación de estado de los gases ideales. El único concepto que queda fuera del actual currículo de Secundaria es el de rozamiento aerodinámico y, por tanto, la determinación de la velocidad terminal. Son instruidos a este respecto y se procede a realizar las demostraciones pertinentes. La principal dificultad es su falta de conocimientos en cálculo integral para llegar a algunas de las expresiones, por lo que esta parte se centra más en el resultado final que en la demostración detallada. A este respecto, se les encomienda a los alumnos la realización de algunos cálculos elementales, despreciando incluso la resistencia aerodinámica, sobre la fuerza de empuje en un globo meteorológico, determinar la máxima carga útil que puede transportar o la aceleración inicial.
- El proceso de instrucción sobre la evolución de un globo en la atmósfera se completa con la realización de algunas sencillas experiencias de laboratorio que simulan las condiciones a las que se verá sometido. Por un lado, el comportamiento de un globo de fiesta al aplicarle una drástica reducción de la temperatura. Para ello se le introduce en una mezcla frigorífica donde queda de manifiesto la consiguiente disminución del volumen. Por otro, y mediante una bomba de vacío, se puede observar el aumento de volumen al disminuir la presión exterior. De este modo queda patente el efecto contrapuesto de las dos variables que afectan al globo. El resultado del efecto conjunto queda reflejado en el desarrollo matemático del [Anexo III](#), donde claramente se muestra cómo el volumen del globo se incrementa con la altitud.
- Se realizan también otras experiencias destinadas a mostrar el empuje provocado por los gases mediante balanzas de Arquímedes, latas de refresco etc.
- Realizar una visita a la delegación de AEMET de Santander en la que reciben una formación por parte de los técnicos correspondientes y toman contacto con los materiales que se emplearán en el lanzamiento definitivo. Ello permite analizar detalles técnicos que deben resolverse de cara al diseño del montaje final. Además, se realizan algunos cálculos de especial relevancia para la experiencia como la cantidad de Helio necesaria, volumen del globo etc. Todas esas cuestiones se explican ampliamente en el apartado destinado a ensayos previos.



- Por último, se instruye a los estudiantes en los dispositivos y materiales más oportunos para el lanzamiento. Así, se les propone la búsqueda de sistemas de localización remota válidos para esta experiencia y se les implica en la consecución de un buen aislamiento térmico de los equipos. Se estudiarán desde varios tipos de GPS a collares de localización de animales por radiofrecuencia.
- Paralelamente a todo esto los alumnos participan de todas las sesiones de pruebas y simulaciones de los equipos que se utilizarán. En el epígrafe dedicado a ensayos se detallan los correspondientes al funcionamiento de la electrónica en condiciones de frío, los límites para la recepción y transmisión de la señal de GPS o la correcta apertura del paracaídas.



Elaborar la memoria justificativa

El objeto de la memoria justificativa es múltiple:

- Poner orden y registrar todos los pasos que se han ido dando para conformar el proyecto.
- Definir todos los elementos y objetivar los conceptos de forma que no haya malentendidos ni pérdidas de información.
- Presentar de forma coherente el proyecto ante posibles colaboradores o interesados.

Con este fin se elaboró una memoria inicial, formalmente similar a la presente, que ha servido para documentar y objetivar el punto de partida y lo que iba a ser la futura secuencia de tareas.

En ella se declaraban los principios que regirían el proyecto, se enunciaban los objetivos del mismo, se describía la experiencia en detalle y se proponían otras muchas cosas como posibles conclusiones, colaboraciones, etc...

Elaborar el presupuesto

Una vez descrito el proyecto y su alcance, es posible estimar el coste que puede suponer y plasmarlo en un documento. De esa estimación inicial, prudentemente ajustada, se ha de llegar a un presupuesto más realista, acorde con la disponibilidad de los recursos con los que hemos contado, fundamentalmente gracias a las colaboraciones antes mencionadas.

Lejos de entender mermas o recortes sobre lo previamente estimado como una limitación, en este proyecto hemos decidido y preferido considerarlos un reto, una oportunidad de explorar opciones que nos permitieran, no sólo abaratar costes, sino además aprender y desarrollar destrezas o metodologías que, de otra forma, no hubiéramos contemplado.

En el [Anexo VII](#) se incluye el presupuesto del proyecto, reflejando lo inicialmente incluido y lo finalmente consignado a medida que se iba desarrollando.



Preparar la actividad: Realización de cálculos y desarrollo de los materiales

En este punto, es en el cual comenzó la participación de los alumnos. Se fijaron los propósitos de cada etapa con sus posibles retos tecnológicos, de organización y las opciones para superarlos.

También se propusieron contenidos didácticos y competenciales, de forma muy general. Durante el transcurso de la experiencia, han ido surgiendo cuestiones ocultas que pusieron a prueba las capacidades del equipo para solucionarlo, por lo que lo que se apuntó en la memoria inicial en estas etapas no resultó en absoluto un listado cerrado. Como hemos dicho, la experiencia se planteó como algo dinámico que las propias condiciones reales irían dando forma definitiva.

Tuvimos que conocer el entorno en el cual se trabajaría, en este caso, la atmósfera en sus capas inferiores. También los posibles medios técnicos con los que se podía contar y su configuración. Por último, establecimos una metodología para ejecutar el experimento, estudiando los fundamentos, funcionamiento y utilidad de los aerostatos.

Los conceptos transferidos a los alumnos durante esta etapa formativa a este respecto, se pueden ver en el [Anexo I](#) y [Anexo II](#) de esta memoria, en los que se trata la atmósfera y los aerostatos.

Cuestiones planteadas

Cuestiones científico-técnicas:

¿Qué características reúne la atmósfera en niveles altos (temperatura, presión humedad y viento)?

¿A qué altitud podemos llegar a ascender por medio de un globo sonda de los utilizados normalmente con propósitos meteorológicos?

¿Qué equipo necesitamos para poder realizar la grabación de imágenes en estas condiciones y para permitirle ascender de forma operativa?

¿Qué evolución sufrirá el globo y equipo en su ascenso y descenso?

¿Qué medios podemos disponer para procurar su recuperación?

Cuestiones medioambientales y sociales:

¿Qué impacto puede tener en la sociedad la experiencia que pretendemos realizar?

¿Es necesario pedir permisos y, si fuera el caso, cuál es el procedimiento?

¿Qué factores hay que considerar para elegir la localización del lanzamiento?

- *¿Qué medio geográfico es el idóneo para el lanzamiento?*
- *¿Qué condiciones meteorológicas serían las ideales y en qué época y lugar accesibles se podrían dar?*



Cálculos y actividades propuestos

Cálculos y estimaciones:

Cálculo de las características y condiciones de ascenso del globo: peso del conjunto globo-sonda, empuje y velocidad de ascenso; altitud máxima prevista y tiempo estimado de vuelo.

Estimación de las condiciones de temperaturas mínimas a niveles altos, según la localización y la época del año en el entorno.

Estimación de posibles trayectorias del globo y limitaciones geográficas.

Actividades:

Búsqueda y elección de equipo técnico para la experiencia y conocimiento de sus limitaciones técnicas: Globo de látex y paracaídas, cámaras digitales de grabación, elementos de geolocalización, posible fuente de calor, etc.

Búsqueda de superación de posibles límites técnicos y de soluciones alternativas.

Construcción de primeros modelos del módulo de grabación y localización.

Durante las semanas siguientes a la reunión del 9 de abril en la que se fijan los contenidos de las actividades con los alumnos, los profesores instruyen a los mismos sobre diferentes cuestiones relativas a la modelización del vuelo del globo aerostático, de las fuerzas implicadas en el mismo y de las metodologías que se han de seguir para realizar los cálculos durante la preparación del experimento.

Estos cálculos y la modelización de los mismos, se incluyen en detalle en el [Anexo III](#) y sucesivos de la memoria.

De forma paralela, se van analizando otras cuestiones relativas a las limitaciones que imponen las condiciones físicas del entorno¹⁰ sobre los diferentes elementos e instrumentación utilizada en la experiencia. Esto implicará numerosos ensayos y exploración de opciones de construcción de los que hablaremos en el siguiente apartado.

Se consideran también otros aspectos importantes como los medioambientales y sociales a los cuales el proyecto no es ajeno. Por una parte, la seguridad en la manipulación de ciertos elementos durante las pruebas ha de estar garantizada y, por otra, hemos de tener la certeza de que nuestro experimento no entraña riesgos que puedan afectar al medio ambiente y, de forma especial, a la actividad aeronáutica que tiene por escenario el mismo entorno del que tratamos.

El 22 de mayo de 2018, se realizó una jornada de trabajo conjunto entre los alumnos y los tres miembros iniciales del proyecto. Con ella, comienza la tarea de formación y preparación de todos los miembros del equipo, sobre los contenidos antes mencionados. Se aprovechó para realizar ciertos experimentos que demuestran en laboratorio cuán

¹⁰ Ya mencionadas en el Anexo I

importantes pueden ser los factores físicos, fundamentalmente presión y temperatura, para la consecución de nuestros objetivos.

También en dicha jornada se instruyó a los alumnos sobre las particularidades y características de la atmósfera y sobre la regulación de la actividad humana que se desarrolla en ella.

Todas estas consideraciones llevan en días sucesivos a tomar ciertas decisiones. En particular, se determina el lugar del lanzamiento, proceso sobre el que se habla en el [Anexo IX](#). Queda fijado en el entorno de la Ermita de la Virgen del Río, en Villada, provincia de Palencia.



Ilustración 3. Ermita de la Virgen del Río en Villada (Palencia)

Es también en estos días cuando es posible, en función de los calendarios y plazos con los que jugamos, determinar el período probable de lanzamiento. En conexión con el Departamento de Coordinación Operativa del Espacio Aéreo de Enaire, se decide solicitar permiso para una horquilla de tiempo que permita optar por una fecha en la que las condiciones meteorológicas supongan un factor favorable para realizar el experimento. Este proceso se explica concisamente en el [Anexo X](#).

El permiso se solicita pues para el período del 2 al 10 de agosto de 2018. Fue necesario en los días previos estudiar la situación meteorológica y determinar cuál de ellos sería el idóneo, toma de decisión que explicamos con detalle en el [Anexo XI](#). El proceso de cálculo de la probable trayectoria se puede ver en el [Anexo XII](#). Tanto la elección del día como la estimación de la trayectoria fueron realizados más adelante, cuando se consideró



suficientemente fiable el pronóstico del tiempo, evitando una excesiva anticipación en el mismo¹¹.

En esta memoria, también se han explorado otras metodologías para el cálculo de la evolución del globo mediante el uso de simuladores que, según diferentes modelos, tratan de predecir la misma. En el [Anexo XIV](#) de esta memoria, se incluye un análisis de algunos de ellos con el objeto de conocer sus aplicaciones y de entender sus limitaciones.

Flujos de información y datos durante el proyecto

Del propio diseño del proyecto, se deriva una importante consecuencia: la coherencia científica del mismo, implica la compartición de la información generada y su uso preferente para la realización de los sucesivos cálculos que se han ido ejecutando.

Este flujo de información, que resulta imprescindible entender para comprender el alcance del proyecto, se esquematiza en el diagrama adjunto. De forma general, podemos decir que, para ejecutar cada etapa del proyecto, es necesario contar con los datos generados en cada una de las anteriores. De la misma forma, para extraer las conclusiones y fundamentarlas, es necesario apoyarse en los cálculos y experiencias que se han ido realizando.

La primera implicación de esta idea es la constante y fluida información entre las partes, procurando facilitar la tarea de transmisión de datos y resultados. En nuestro caso, ha sido provechosa, constante y nos ha proporcionado la oportunidad de aproximarnos a metodologías nuevas y diversas.

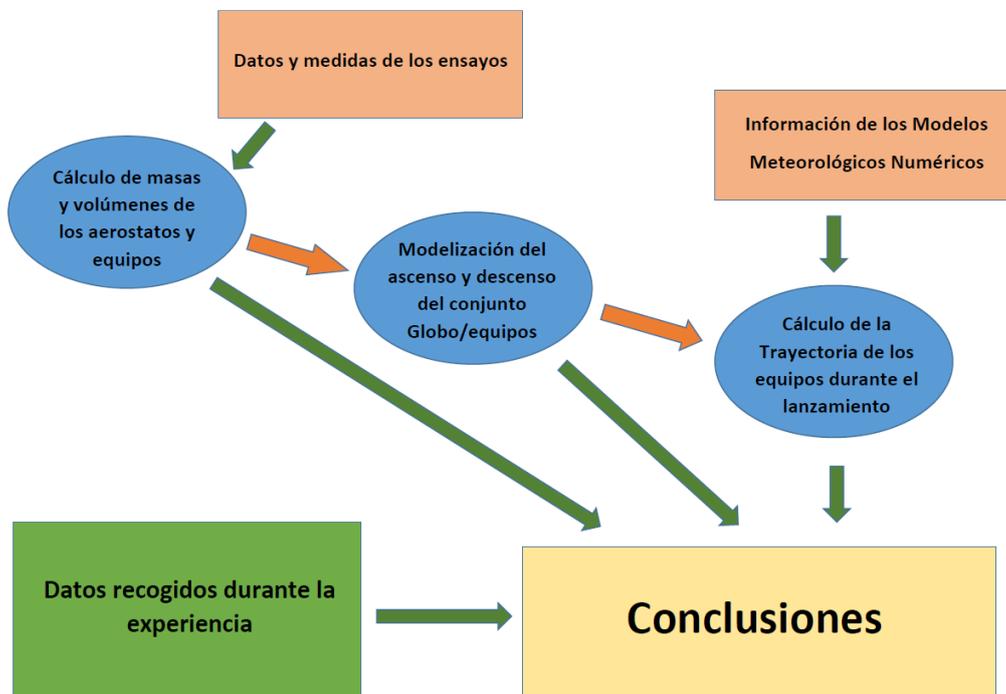


Ilustración 4. Diagrama de flujos de datos e información durante el Proyecto Yuri.

¹¹ Finalmente, y en función de los factores antes mencionados, se fijó el lanzamiento en el día 10 de agosto de 2018



Preparar la actividad: Realizar ensayos

Cuestiones planteadas

Cuestiones científico-técnicas:

¿Cómo podemos comprobar si efectivamente hemos calculado correctamente el empuje inicial efectivo?

¿Cómo podemos comprobar que los equipos de grabación pueden mantenerse operativos durante la totalidad del experimento?

¿Cómo podemos constatar la suficiencia del alcance del equipo de localización?

Cuestiones medioambientales y sociales:

¿Son suficientes los medios presupuestados o es necesario recurrir a recursos externos no previstos?

¿Producimos algún impacto medioambiental durante los ensayos que deba ser considerado?

Una vez obtenido un primer modelo instrumental que, según lo estimado, pueda realizar la experiencia, hemos de constatar que nuestros cálculos y previsiones son los correctos. La única manera de hacerlo es mediante la realización de ensayos que, bajo un entorno controlado, reproduzcan las condiciones críticas para el éxito del experimento.

Para que cualquier investigación pueda resultar satisfactoria resulta imprescindible la realización de un trabajo preciso, coordinado, bien planificado y estructurado previamente. En el caso de una investigación como la que se detalla en esta memoria, han jugado un papel relevante las condiciones en las que se produciría el ascenso de nuestro globo, muy diferentes a las existentes sobre la superficie terrestre. Esta es la razón por la que, desde los inicios del proyecto, se planteó llevar a cabo una serie de pruebas en condiciones similares a las que nuestro globo, junto con su carga, encontraría al elevarse en la atmósfera. También fueron consideradas necesarias pruebas de recepción de coordenadas GPS, así como de estabilidad del sistema constituido por el globo y el lastre.

La relación de sesiones con las tareas y ensayos realizados es la siguiente:

- Construcción de la caja portadora de los instrumentos.
- Preparación y programación de los componentes electrónicos.
- Determinación de la fuerza ascensional del globo, estimación de la presión ejercida por el látex en el interior y comprobación de la esfericidad del globo.
- Pruebas a baja temperatura.
- Pruebas con el sensor de presión de un iPhone.
- Comprobación masa total.
- Ensayos de estabilidad de la grabación durante el vuelo.
- Funcionamiento de los sensores de presión y temperatura.
- Recepción de coordenadas GPS.



Cálculos y actividades propuestos

Cálculos y estimaciones:

Cálculo de las características y condiciones de ascenso del globo: peso del conjunto globo-sonda, empuje y velocidad de ascenso; altitud máxima prevista y tiempo estimado de vuelo.

Estimación de las condiciones de temperaturas mínimas a niveles altos, según la localización y la época del año en el entorno.

Estimación de posibles trayectorias del globo y limitaciones geográficas.

Actividades:

Ensayo de empuje del globo con cargas. Se realizará en las instalaciones de la Delegación Territorial de Aemet en Cantabria merced a la colaboración prestada por la misma.

Ensayo de duración de batería y funcionamiento del equipo en condiciones de frío extremo y actividad prolongada. Se realizará en los laboratorios del Departamento de Física y Química del IES Valle del Saja.

Pruebas de alcance del equipo localizador. Se realizarán en campo.



Construcción de la caja portadora de los instrumentos

Los equipos electrónicos de captación de información y de grabación de imágenes y datos han de ir ubicados en un elemento hecho fijo al globo, que es el elemento propulsor. En esta memoria, denominamos indistintamente a dicho elemento como caja portadora o como módulo.

Este módulo, se construye bajo una serie de condiciones y ha de cumplir los siguientes requisitos:

1. Ha de ser lo más ligero posible para no penalizar el conjunto con carga inútil y que limitaría la duración y altitud del experimento.
2. Ha de proporcionar la debida protección térmica y ambiental a los equipos, teniendo en cuenta las condiciones de presión, temperatura e insolación a las que se someterá el conjunto.
3. Ha de ser frangible en la medida de lo posible. La posible violencia del impacto a su llegada al suelo, no puede suponer un peligro para las personas o bienes en la superficie ni para los equipos contenidos en su interior.
4. Ha de garantizar la correcta lectura de las medidas y grabaciones audiovisuales para no frustrar los objetivos del proyecto.

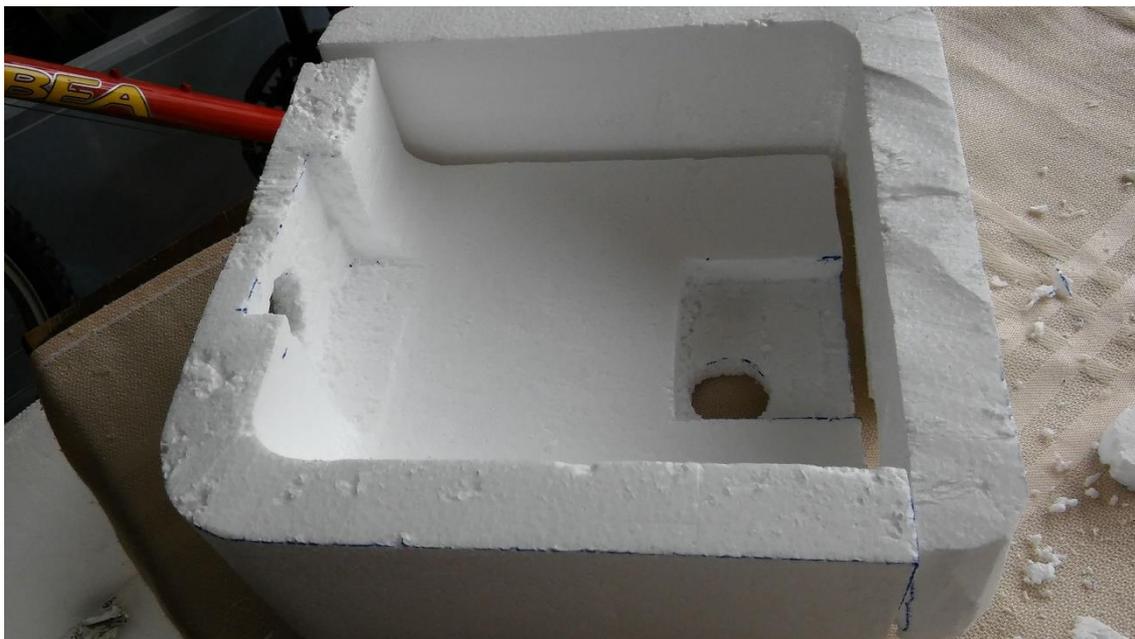


Ilustración 5. Estructura de Porexpan del módulo.

Para el correcto aislamiento y protección de los equipos se ha optado por utilizar una estructura de porexpan expandido. Esto ha sido así por varias razones:

- Por un lado, reúne las condiciones térmicas adecuadas que facilitan el aislamiento del habitáculo interno.
- Es un material de muy poco peso y de una resistencia y rigidez suficientes para soportar el peso de los equipos y las aceleraciones previstas.

- Es fácilmente trabajable y se puede tallar, cortar y perforar sin recurrir a herramientas especiales.
- Es barato y fácilmente accesible.

Tras medir los equipos y probar distintas disposiciones de los mismos, decidimos construir una caja que los albergara sin penalizar en volumen. Preparamos las distintas ubicaciones y practicamos los orificios necesarios para poder ubicar los objetivos de las cámaras de grabación. El resultado se puede ver en la anterior ilustración.

Para garantizar el aislamiento del conjunto, decidimos recubrir la caja con una manta térmica ligera, de uso común en deportes de montaña y de muy pequeño coste.



Ilustración 6. Manta térmica y caja recubierta

Para hacer firmes las uniones y coberturas recurrimos a cola blanca y a cinta americana, que aportaban la suficiente solidez y resistencia. El resultado es el que se puede ver en la ilustración.

Para realizar la fijación de los elementos internos se recurrió a palos de madera ligera de los utilizados en marquetería. Eran lo suficientemente recios para garantizar la sujeción de los instrumentos ante las aceleraciones durante el ascenso/descenso y, por otro lado, suficientemente frágiles para romperse en caso de impacto violento y evitar que toda la energía recayera sobre los equipos.

Por otro lado, la ubicación de otros elementos como los calentadores de manos que contribuyeran a mantener la temperatura interior en niveles operativos o los objetos que decidimos adjuntar como homenaje, no suponían problema alguno para el desempeño de los instrumentos ni para la seguridad estructural del módulo.



Ilustración 7. Caja portadora y palos de sujeción.

Tras construir la estructura y el recubrimiento de la misma, se aplica en la parte superior una leyenda identificadora que pueda ser útil para una posterior recuperación de los equipos, a través de los nombres y teléfonos de contacto de los autores del proyecto.



Ilustración 8. Módulo con etiquetas identificadoras



Preparación y programación de los componentes electrónicos

Todos los componentes electrónicos que se van a enviar junto al globo deben someterse a una programación previa e incluso a una adaptación para las condiciones a las que se van a ver sometidos. Fundamentalmente, los equipos a preparar son: los sistemas de fotografía, los localizadores GPS y toda la central de recogida de datos de presión y temperatura a través de sensores. El desarrollo de la electrónica Arduino se puede ver en el [Anexo XVI](#).

Cámaras

La recogida de imágenes se hará a través de dos cámaras deportivas de la marca Gopro, modelo Hero3+ Black Edition. La disposición de sus campos visuales formando 90° permite la grabación cenital y la grabación del horizonte. Las cámaras van fijadas dentro de la caja de poliestireno expandido (porexpan) a la que se le practican dos orificios para encajar en ellos los objetivos, procurando evitar el viñeteado. Mediante las aplicaciones nativas de Gopro para móvil se puede ver la imagen registrada por la cámara en la pantalla del teléfono. La visión diáfana de todo el campo de grabación determina el grado de penetración del objetivo en el orificio.

Dado que se pretende obtener imágenes panorámicas ambas cámaras trabajarán en el modo angular, denominado w (wide) en el display. La focal equivalente, en una SLR de 35mm sería de 17,2mm (dato proporcionado por el fabricante). Esto supone un ángulo de visión horizontal de unos 120°.

La cámara cenital grabará vídeo en modo full HD 1080p con una frecuencia de 50fps mientras que la orientada al horizonte registrará vídeo full HD, pero a 30fps. La razón de esta discrepancia se encuentra en la duración de la batería. Una frecuencia de cuadro elevada acorta la autonomía de la batería, dado que la cantidad de información que procesa por segundo es mucho mayor. Si a eso le sumamos que a bajas temperaturas (se explica en el apartado correspondiente) la carga disminuye notablemente entonces debe optimizarse al máximo su operatividad. Por ello, es más recomendable asegurar la “vida” de la cámara que graba el horizonte por ser estas las imágenes de más valor.

En cuanto a la resolución, es aconsejable que sea, al menos, 1080p dado que la definición de las imágenes obtenidas debe primar incluso sobre la estabilidad de las mismas. Una frecuencia elevada (de 50fps en adelante) consigue un doble objetivo, tener imágenes mucho más fluidas y con menos “saltos” y, llegado el caso, poder ralentizar el vídeo con mucha más calidad. El modo 1080p en este modelo solo permite llegar hasta los 50 cuadros por segundo. Para llegar hasta los 120fps hay que descender hasta una resolución de 720p que, aun siendo HD, provoca una disminución apreciable de la definición de la imagen. Esto no es deseable en ningún caso, dado que las imágenes que se pretende obtener son muy apropiadas para contemplarse al mayor tamaño posible.

Otros modelos más modernos permiten grabaciones a más resolución (4k y superiores) manteniendo frecuencias elevadas pero todo ello encarece el proyecto y, sobre todo, complica el tratamiento posterior de las imágenes.

Para aligerar el peso y permitir la conexión de otros elementos, las cámaras se introducen desprovistas de la carcasa de plástico que las acompaña de serie.

Complementos

La vida de la batería standard en las condiciones anteriormente descritas puede extenderse hasta las 2 horas, aunque dependiendo del estado de la cámara o de la propia batería este dato puede variar significativamente. Para prolongar la duración existen unidades externas que acopladas a través del puerto trasero pueden llegar a duplicar la vida de la grabación. Se elige el siguiente modelo: Batería GoPro Abpak-401 3,8V 1240mAh



Ilustración 9. Extensión de batería suplementaria.

Con esta extensión de batería se comprobó que, a temperatura ambiente, la cámara era capaz de estar grabando en la configuración descrita por periodos superiores a las 4 horas.

Para asegurar que las temperaturas de la estratosfera no disminuyan en exceso estos valores, se decidió introducir dentro de la caja de los equipos dos calentadores de mano que se describen en el apartado de pruebas a baja temperatura.

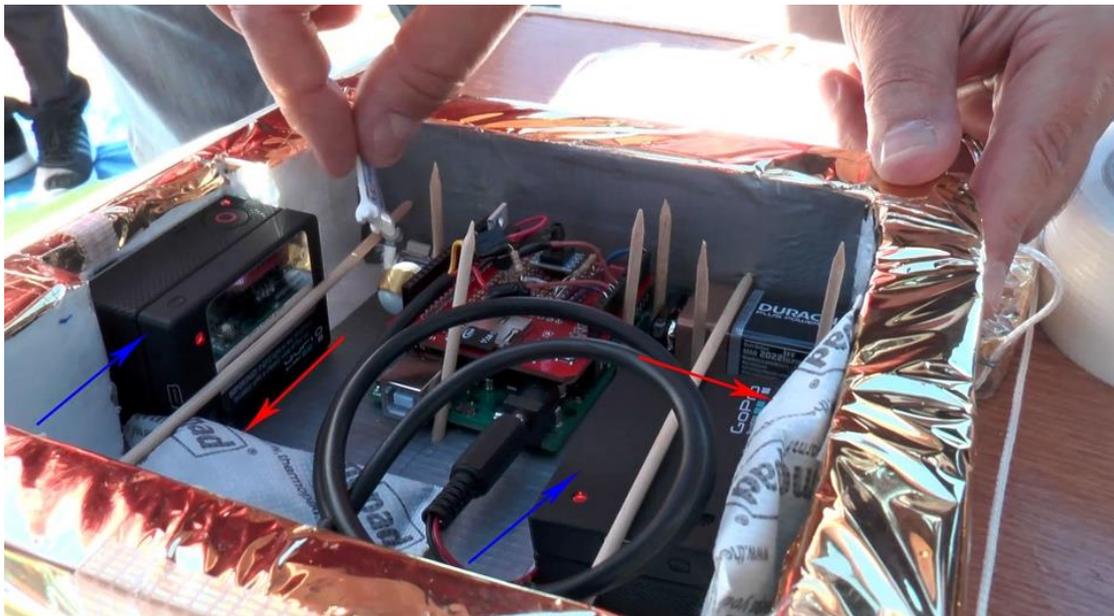


Ilustración 10. Disposición de calentadores (en rojo) y de extensión de batería (en azul) dentro de la caja



Tarjetas

Otra cuestión de especial interés es la elección de las tarjetas de memoria de las cámaras de vídeo. En nuestro caso se eligen dos de la marca Sandisk XC modelo Extreme UHS Speed class 3, video speed class v30 de 64GB. Analicemos estos datos.

La primera consideración de importancia es la capacidad de las tarjetas. Una cámara del modelo considerado anteriormente puede registrar más de 4 horas de vídeo full HD en una tarjeta de 64GB. Dado que se estima que el vuelo completo del globo puede estar en torno a las 2 horas es recomendable (y económico) utilizar la mencionada capacidad de 64GB. Capacidades superiores conllevan en ocasiones una mayor lentitud en la transmisión de datos, tanto de lectura como de escritura, por lo que parece razonable no utilizar volúmenes de almacenamiento especialmente elevados.

La estabilización de la imagen es crítica en un vídeo que se graba desde una plataforma en constante movimiento. Las cámaras actuales tienen mecanismos de estabilización tanto mecánicos como digitales siendo los primeros los únicos que realmente ofrecen una respuesta aceptable para estas situaciones. Solamente las cámaras y, sobre todo, los objetivos réflex de gama alta consiguen solucionar problemas de este tipo. Por eso es fundamental que no haya saltos añadidos derivados de una transmisión de datos lenta o defectuosa. Esta cuestión se solventa eligiendo tarjetas con una buena velocidad de escritura. Las marcas comerciales suelen exponer en los envoltorios números con elevadas velocidades, pero normalmente son las referidas a la lectura. Una velocidad de escritura mínima de 30MB/s permite grabar con bastantes garantías vídeo en formato 4k y por supuesto en 1080p, por ello se escoge lo que hoy en día denominan tarjetas de clase 3 o lo que es lo mismo con velocidad mínima de escritura 30MB/s. No obstante, las velocidades medias pueden estar por encima de los 60MB/s. Valores inferiores pueden dar lugar a parones momentáneos por saturación de la memoria que interrumpen la grabación durante unos breves segundos, algo totalmente indeseable en un vídeo de acción. La imagen final también se puede estabilizar digitalmente con los editores de vídeo, pero con unos márgenes de tolerancia muy reducidos. La estabilidad de grabación en un globo meteorológico será mecánica o no será.

Por último, hemos de destacar que las tarjetas clasificadas como XC son las de máxima calidad para la grabación en alta definición.



Ilustración 11. Tarjeta de memoria de vídeo



Localizadores GPS

Buena parte del presupuesto y de las pruebas previas al lanzamiento se dedican a tener un buen sistema de localización del globo una vez que regrese a tierra. Se barajan muchas posibilidades de búsqueda remota pero la mayoría se desestiman por su elevado coste o por tener coberturas sujetas a ciertas limitaciones. En este sentido cabe destacar los transmisores colocados en collares de perros o de aves rapaces.

Obviamente, la solución ideal parece la utilización de transmisores GPS. De hecho lo es,, pero el espectro de posibilidades es digno de análisis.

En primer lugar, deben definirse las necesidades, a saber, tener un buen posicionamiento del globo en el plano, decidir el sistema más adecuado para ello y obtener en tiempo real los datos de estas mediciones.

Las dos primeras cuestiones van inevitablemente unidas. A pesar de no ser el objetivo de este trabajo es necesario aclarar algunos conceptos básicos sobre localización GPS. La actual constelación de satélites que configuran el sistema de posicionamiento global permite definir puntos sobre el globo terráqueo con la referencia de tres satélites y ofrecer posiciones bidimensionales precisas (latitud y longitud), a este modo se le suele denominar navegación 2D. Por el contrario, si el sistema logra tener referencia de, al menos, cuatro satélites con una buena geometría es capaz de localizar una posición en el espacio en función de latitud, longitud y altitud, es el modo de navegación 3D.

Hay multitud de consideraciones sobre cuál es el sistema más preciso para localizar puntos sobre el plano terrestre, si la navegación 2D o la 3D. Si se dispone de un altímetro barométrico en la propia unidad es mucho más preciso realimentar la coordenada de altitud en la medición del GPS, dado que esa información “extra” permite a las medidas de latitud y longitud minimizar el error. Sin embargo, en el modo 3D no se puede fijar una medida de altitud ya que el sistema la va a obtener triangulando con cuatro satélites. Por cuestiones de recepción de señal y otras de geometría esférica (demasiado extensas para detenerse aquí) la imprecisión que se tiene en la coordenada de altitud es mucho mayor que en las de longitud o latitud. Si se trata solamente de utilizar un GPS como altímetro resulta mucho más efectivo cualquier dispositivo barométrico. De hecho, en todas las aproximaciones a tierra los aviones toman como referencia la presión barométrica para determinar su altura con la mayor precisión.

En esta experiencia no se tiene la posibilidad de acceder a la unidad una vez lanzado el globo, con lo cual la posibilidad de hacer cualquier realimentación externa está descartada. Además, para la recuperación del globo solo interesa su localización en el plano. Por otra parte, parece lógico que, si se va a hacer un estudio de las variables atmosféricas mediante sensores, se utilicen las medidas de presión obtenidas para derivar las coordenadas de altitud del globo. Por tanto, se opta por adquirir sistemas de localización GPS que posicionan la unidad solo con latitud y longitud. Obviamente sería interesante realizar un estudio comparativo de las medidas de altitud obtenidas por GPS y por consideraciones barométricas, pero los modelos estudiados son mucho más caros. La marca GARMIN ofrece dos excelentes modelos, pero de un coste bastante más elevado.



Por último, debe abordarse una cuestión determinante para el éxito de la experiencia: el envío de los datos de posicionamiento en tiempo real. Algunos GPS admiten la posibilidad de envío de mensajes a teléfonos móviles o a direcciones de correo, lo cual supone un grave problema si en esa zona no se localiza ninguna antena de telefonía. Por eso es completamente necesario utilizar unidades que se comuniquen con cualquier servidor en tierra a través de satélite lo que garantiza tener siempre el globo ubicado. Desde hace unos años se están utilizando, en experiencias similares a la que aquí se describe, localizadores de emergencia para aventura extrema. El modelo más recomendable y finalmente utilizado es el SPOT GEN3.



Ilustración 12. GPS Spot Gen3. Fuente: Spot Gen3 TM

El Spot Gen3 es perfecto para las labores de localización. Ni siquiera es un GPS como tal, en el sentido de mostrar posiciones en una pantalla, solamente se limita a ubicarse y a reenviar los datos de posicionamiento. La unidad tiene un precio muy razonable y una vez adquirida el usuario debe registrarse en su propia web y contratar alguno de los servicios que ofrece este sistema. La máxima cobertura, a día de hoy, es la que el fabricante denomina “rastreo extremo” consistente en la localización y envío de coordenadas cada 2,5 min. Para salvar la posibilidad de puntos “negros” el envío se realiza a través de la constelación de los conocidísimos satélites Iridium. Esto ofrece una garantía casi 100% de que se conocerá en todo momento la ubicación del globo. Utilizar lo que antes se denominaba telefonía satelital encarece notablemente este producto. En principio, y salvo cancelaciones de contrato, se establece una permanencia de un año. En esta modalidad disponemos de mensajes ilimitados durante todos los días del año. Más cómodo y clarificador que el envío a un email resulta instalar la aplicación del propio SPOT en un teléfono móvil, donde se podrán recibir no solo las coordenadas de longitud y latitud sino una imagen sobre mapa en la que se incluyen los puntos correspondientes a las ubicaciones recibidas. Aquí se muestra una imagen real del teléfono el día del lanzamiento:



Ilustración 13. Detalle de las posiciones recogidas por la aplicación de Spot Gen3.

Como todos los GPS comerciales Spot Gen3 tiene algunas restricciones impuestas por los Departamentos de defensa de EEUU. La primera, y más conocida, es la pequeña imprecisión aleatoria que se establece para las coordenadas geográficas. La segunda, es la cancelación del servicio para alturas superiores a los 18000m. Incluso el propio fabricante y otros usuarios aseguran haber tenido cortes de comunicación por encima de los 12000m. En la experiencia que aquí se describe hubo envío de datos incluso por encima de los 20000m. Es verdad que algunos chips GPS como los que se envían en las sondas meteorológicas no se ven afectados por esta limitación. A día de hoy, se desconocen las razones que propiciaron la recepción de señal en todo el vuelo del globo.

Spot Gen tiene un sensor de movimiento que lo hace entrar en suspensión después de 5 min de no registrar desplazamiento. Si pasada una hora no ha recuperado el movimiento se apaga directamente. Esto es especialmente problemático si por alguna razón no se ha obtenido la ubicación del globo al llegar a tierra, ya que aumenta el radio de búsqueda al tener como referencia la última posición emitida. La razón principal por la que el envío/recepción de señal puede verse afectado es que el dispositivo se encuentre boca abajo, ya que la antena es interna y se encuentra adosada a la tapa superior. Para un correcto funcionamiento necesita estar orientada hacia el cielo, cosa que en el momento de golpear en tierra no puede asegurarse. De ese modo se decidió utilizar dos unidades Spot colocadas en oposición en las tapas superior e inferior de la caja de porexpan para tener la garantía de que, al menos, uno de los dos está operativo.



Ilustración 14. Colocación de los dispositivos de localización en la caja el día del lanzamiento



Determinación de la fuerza ascensional del globo, estimación de la presión ejercida por el látex en el interior y comprobación de la esfericidad del globo.

Con la finalidad de determinar los valores de algunas de las magnitudes físicas relativas a nuestro globo se llevó a cabo una importante sesión de trabajo en la delegación que AEMET tiene en Cantabria. Se realizaron las siguientes medidas:

1. Presión atmosférica.
2. Temperatura de la sala.
3. Presión interior en el globo.
4. Lectura de la balanza para el lastre con el que sujetar el globo: $P(\text{lastre})$
5. Lectura de la balanza para el sistema globo inflado más lastre: $P(\text{lastre}) + P(\text{látex}) + P(\text{helio}) - \text{Empuje}$
6. Radio del globo.

Los datos medidos y tabulados fueron los que se exponen en lo que sigue:

Tabla 2. Valores medidos durante la sesión en la DT Aemet en Cantabria

Magnitud	Dato medido
T	291,2 K
pext	1015,88 hPa
pint1 (t = 2,15 min)	1016,7 hPa
pint2 (t = 3,30 min)	1018,4 hPa
pint3 (t = 4,20 min)	1018,6 hPa
m (lastre)	3018,1 g
m (globo inflado + lastre)	1387 g
r (globo)	0,751 m

Los datos referentes a la presión en el interior del globo se midieron utilizando el sensor de presión de un iPhone introducido en él. El muestreo de datos se realizó a 1 Hz y se establecieron dos estados intermedios durante el llenado, y un tercero correspondiente al estado final de llenado.



Ilustración 15. Medida del perímetro del globo



Ilustración 16. Medida de la fuerza ascensional

Los cálculos realizados durante este ensayo y los resultados obtenidos, así como el detalle de su formulación se pueden ver en el [Anexo VIII](#) de esta memoria.



Ilustración 17. Medida de la presión interior del globo

Pruebas a baja temperatura.

Por otra parte, se hizo necesaria la realización de pruebas a baja temperatura debido a que durante el vuelo los componentes electrónicos y los materiales que viajan con el globo deben resistir condiciones de temperatura muy desfavorables, próximas a valores de -60°C para algunas altitudes, razón por la que podrían verse modificadas las propiedades de algunos de los elementos del sistema y provocar un incorrecto funcionamiento de los mismos.

Para llevar a cabo dichas pruebas se procedió a utilizar la caja construida tal y como se describe en apartados anteriores. Por el momento, y hasta constatar la eficacia de las

soluciones adoptadas para su construcción durante los ensayos, sería considerada formalmente una caja de pruebas.

A continuación, se dispuso la caja de pruebas conteniendo las cámaras, las baterías y unos calentadores en una caja con hielo seco (T^a de sublimación = $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a 1 atm de presión). La temperatura que se alcanzó en la cámara interior de la caja que queda sobre la superficie del $\text{CO}_2(\text{s})$ ($\text{CO}_2(\text{g})$ + aire) fue de, aproximadamente, $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las cámaras estuvieron grabando durante dos horas a esa temperatura, pero se requería comprobar el funcionamiento a una temperatura inferior puesto que a partir de los 6000 m de altitud el globo y su lastre deberán soportar temperaturas inferiores a los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, llegando a alcanzar en el punto de altura máxima -56 o $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto condujo a la decisión de repetir este ensayo con nitrógeno líquido, elemento cuya temperatura de ebullición es de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura que, muy probablemente, aseguraría que se alcanzase una temperatura tan baja en la cámara de gas sobre la superficie libre del $\text{N}_2(\text{l})$ ($\text{N}_2(\text{g})$ +aire) como la de la estratosfera. Pospusimos este nuevo ensayo a la espera de conseguir el nitrógeno líquido.

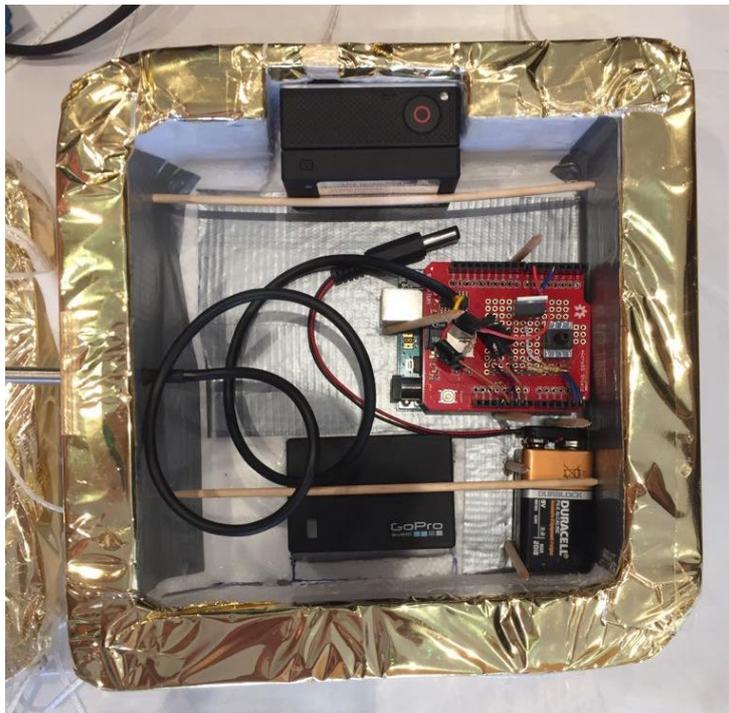


Ilustración 18. Disposición de los elementos dentro de caja durante los ensayos

Para la prueba con nitrógeno líquido se mantiene la caja conteniendo las cámaras grabando, así como el Spot Gen3, en el interior de una atmósfera con elevada concentración de $\text{N}_2(\text{g})$; se consigue, de este modo, una temperatura de $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$. El resultado, a los 50 minutos de grabación de las cámaras en estas condiciones, en lo que respecta a la capacidad restante de las baterías de las cámaras es de la mitad para la dispuesta en posición cenital y de dos tercios para la horizontal; al cabo de, aproximadamente, una hora y media, las capacidades restantes son de la mitad en ambos casos.



Ilustración 19. Pruebas con CO₂ y con Nitrógeno líquido



Ilustración 20. Cuba de inmersión de los equipos en Nitrógeno líquido.

Pruebas con el sensor de presión de un teléfono móvil inteligente.

Previamente, se constató que las lecturas tomadas en el entorno de los 1000 hPa por el dispositivo eran coherentes con las medidas por los sensores de precisión ubicados en la Oficina Meteorológica del Aeropuerto de Santander. Se trata de dos baro-transmisores tipo PA21 marca Vaisala, con cápsulas aneroides triplicadas.



Ilustración 21. Baro-transmisores de la Oficina Meteorológica del Aeropuerto de Santander

Se comprobó el funcionamiento del sensor en el interior de una campana en la que se hizo el vacío progresivamente; este ensayo se realizó tanto con el móvil dentro de una caja de porexpan (elaborada “ad hoc” siguiendo los mismos procedimientos que la que sería utilizada en el lanzamiento) como fuera de ella. Se comprobó que las medidas de presión dadas por el sensor en los dos ensayos eran prácticamente las mismas, lo cual quedó justificado debido a la porosidad de la caja y, por tanto, a la adecuada circulación de aire a su través para asegurar así la igualdad de presiones.

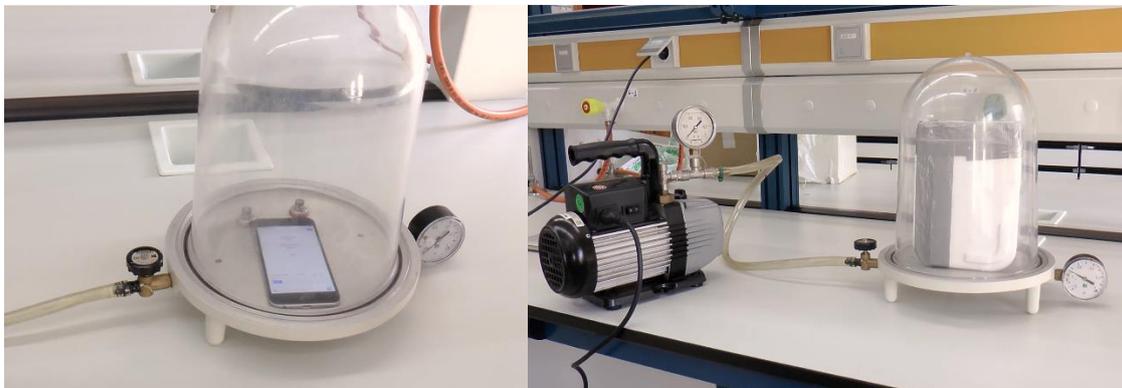


Ilustración 22. Medidas efectuadas con el sensor de presión en condiciones próximas al vacío, dentro y fuera de la caja.

Comprobación de la masa total.

Para el cálculo de la masa total del sistema equipos-globo, se tuvo en cuenta la totalidad de los pesos que integraban la carga útil, estructuras, elementos de anclaje, paracaídas, globo, masa de helio y equipos de grabación y electrónicos.

La masa de la carga total que finalmente llevará el globo, incluido el paracaídas, dio el siguiente resultado: masa carga útil + masa paracaídas = 756 g + 60 g = 816 g (en el



momento del lanzamiento se incluyó la tarjeta del elemento hidrógeno de 4 g con lo que la masa total sería de 820 g).



Ilustración 23. Medida de la masa de la carga útil que lleva el globo.

Comprobación de la estabilidad de la grabación durante el vuelo.

Para el ensayo de estabilidad de la grabación durante el vuelo se suspendió, unida al paracaídas, la caja conteniendo las cámaras grabando desde una altura de unos 8 o 10 m y se soltó todo el conjunto en caída libre. El paracaídas se abrió y la caída libre se produjo con la verticalidad y estabilidad suficientes como para que la disposición de los elementos en su llegada al suelo resultara igual que en el instante de la liberación.



Ilustración 24. Caída libre del sistema "carga útil + paracaídas" que irá suspendido del globo

Funcionamiento de los sensores de presión y temperatura.

Para comprobar el funcionamiento de los sensores de presión y temperatura conectados en la placa Arduino se introdujeron dichos sensores en el interior de una campana de vacío y fueron sometidos a diferentes presiones inferiores a la normal hasta alcanzar valores próximos al vacío. Se comprobó que las medidas de presión dadas por el sensor correspondían a la disminución progresiva realizada; también se chequeó que el sensor

de temperatura arrojará el valor correspondiente a la temperatura ambiente en los intervalos de tiempo programados.



Ilustración 25. Sensores de presión y temperatura en condiciones próximas al vacío.

Recepción de coordenadas GPS.

Respecto a la recepción de coordenadas GPS se utilizó el dispositivo Spot Gen3.

Para comprobar el buen funcionamiento de este dispositivo tanto en la comunicación con satélites como en el posterior envío de los puntos de localización a un teléfono móvil, se realizaron varias pruebas de localización, seguimiento y recepción de señales en Tierra. En todas ellas, y siempre que el dispositivo se encontrara en movimiento, dicho receptor funcionó con buena precisión; únicamente en las situaciones de inmovilidad se comprobó que el sensor de movimiento, como resultaba obvio, no enviaba las ubicaciones GPS.



Ilustración 26. Recepción de las coordenadas de posición y localización del dispositivo GPS.



Desarrollar la actividad: Lanzar globo y módulo

Más allá de lo previsto, siempre surgen elementos que alteran las programaciones diseñadas. Hemos llevado a cabo el plan que elaboramos de acuerdo con los cálculos y las experiencias, pero conservamos una actitud flexible que nos permitió superar los problemas que sobrevinieron.

En esta etapa, la actitud colaborativa ha sido fundamental. Fue necesario poner en juego toda la potencia imaginativa y la capacidad del equipo. Nadie sobró y todos aportaron.

Claves

- Trabajo colaborativo
- Respeto a lo planificado

Preparación previa al lanzamiento

Los detalles de la elección del lugar del lanzamiento y de la fecha del mismo ya se han explicado en los [Anexos IX](#) y [Anexo XI](#) de la memoria. Su determinación resultó imprescindible para abordar con la necesaria confianza la ejecución del lanzamiento y canalizar así el éxito del proyecto. De hecho, la adecuada ubicación del punto de lanzamiento y las óptimas condiciones meteorológicas resultaron cruciales.

Para llevar a término el lanzamiento se hizo necesario confeccionar un extenso listado de materiales que hubo de prepararse con la necesaria antelación. Debía evitarse la falta de previsión que pudiera conducirnos al error de no disponer de algunos de los elementos básicos para la ejecución del lanzamiento, seguimiento y posterior recuperación.

Tabla 3. Listado de materiales necesarios para ejecutar el lanzamiento.

LISTADO DE MATERIALES	
Clase	Materiales
<i>Documentación</i>	- Permiso de Enaire - Tabla de registro de tareas
<i>Elementos soporte</i>	- Lona suelo - Mesas plegables - Sillas plegables
<i>Equipo para montaje</i>	- Caja de herramientas - Cintas varias, cola, cordaje y anclajes - Cámaras - Localizadores GPS - Equipo Arduino - Cableado y herramienta para Arduino - Bombona y manorreductor para bombona de helio
<i>Equipo para recuperación</i>	- iPhone para recepción seguimiento - Cargador para iPhone - Smartphones componentes equipo - Cargadores para smartphones - Prismáticos



Tareas previas al lanzamiento

Finalmente, con los preparativos y materiales listos el día 10 de agosto nos reunimos todos los miembros participantes, así como algún otro acompañante, en Puente San Miguel desde donde iniciamos ruta por la A-67 hasta Osorno y, desde allí, continuamos por la N-120 en dirección a Cervatos de la Cueva. Posteriormente nos dirigimos a Villada por la p-972 llegando a nuestro destino alrededor de las 9:00 a.m., hora local.

Una vez en el lugar del lanzamiento lo primero que se hizo fue constituir los diferentes equipos de trabajo y repartir entre ellos las tareas a realizar. Se eligió el punto de lanzamiento y se dispusieron allí, de manera ordenada, los elementos vinculados: material para el inflado, anclajes, etc. Además, se dispuso el área de trabajo para las operaciones propias de los equipos.

A continuación, se dio comienzo a las tareas. En primer lugar, uno de los componentes del equipo inició el registro secuenciado de las actividades de la jornada en la tabla previamente diseñada y contemplada en el listado de materiales para tal fin. Esta tarea de registro se prolongó hasta el momento de recuperación del equipo que ascendió junto con el globo.

La tabla 4 que incluye la enumeración detallada de todas las tareas que debían quedar registradas es la que se expone a continuación.

Se dio inicio entonces al llenado del globo. Se comenzó la operación asegurándolo convenientemente con los elementos de anclaje y se fue controlando la medida del perímetro que, progresivamente, fue alcanzando.



Ilustración 27. Llenado y control de diámetro del globo de látex.



Tabla 4. Impreso de registro de tareas durante el lanzamiento.

<i>Tareas</i>	<i>Hora de comienzo</i>	<i>Hora de finalización</i>
<i>Distribución de equipos</i>		
<i>Reparto de tareas</i>		
<i>Elección del punto de lanzamiento</i>		
<i>Colocación de lona y elementos soporte</i>		
<i>Establecimiento del área de trabajo</i>		
<i>Inicio del registro de tareas</i>		
<i>Conexión del globo de helio</i>		
<i>Llenado del globo de helio</i>		
<i>Comprobación de los equipos</i>		
<i>Montaje de elementos en la caja</i>		
<i>Encendido de equipo Arduino</i>		
<i>Encendido de cámaras</i>		
<i>Encendido de localizador GPS</i>		
<i>Recepción de 1ª señal de localización</i>		
<i>Sellado de la caja</i>		
<i>Anclaje de la caja al equipo propulsor</i>		
<i>Comprobación del anclaje</i>		
<i>Despliegue del equipo con globo cautivo</i>		
<i>Comprobación de continuidad localización</i>		
<i>Lanzamiento del equipo</i>		
<i>Recogida de elementos de campo</i>		
<i>Comienzo del seguimiento del equipo</i>		
<i>Evento:</i>		
<i>Localización del equipo</i>		
<i>Recuperación del equipo</i>		



Antes de dar comienzo al inflado del globo se consideraron las condiciones de presión y temperatura en el lugar y momento elegidos para la puesta en libertad del equipo. El análisis de dichas condiciones y la constatación de una temperatura algo inferior a la inicialmente prevista, llevó a reconsiderar la masa de helio y, en consecuencia, la del perímetro del globo, que habían quedado estimadas en unos 320 g y 4,87 m, respectivamente, tras los resultados obtenidos de los ensayos previos y los arrojados por los simuladores utilizados para el ascenso y estallido del globo.

El llenado del globo con helio transcurrió desde las 10:02:12 h hasta las 10:19:33 h, bajo unas condiciones de presión y temperatura de 932 hPa y 20,6 °C, hasta alcanzar un perímetro final de 4,82 m. En cuanto al encendido de la electrónica correspondiente a los sensores de la placa Arduino se produjo a las 11:09:09 h.

Con los datos recogidos en el momento de llenado del globo se determinó la masa de helio finalmente en él contenida. En lo que sigue, se explicitan los cálculos correspondientes.

$$\text{Radio} = \frac{\text{Perímetro}}{2\pi}; \quad r = \frac{4,82 \text{ m}}{2\pi} \approx 0,7671 \text{ m} \quad (1)$$

$$\text{Volumen (esfera)} = \frac{4}{3}\pi r^3; \quad V(\text{esfera}) = \frac{4}{3}\pi 0,7671^3 \text{ m}^3 \approx 1,89 \text{ m}^3 \quad (2)$$

Se consideró el incremento de volumen correspondiente a la forma de esferoide que adopta el globo y que, en los ensayos experimentales previos, y tras la aplicación del programa *GeoGebra*, quedó tabulado en un 6,9 % aproximadamente. De acuerdo con este incremento porcentual se determinó el volumen del esferoide correspondiente al globo:

$$6,9\% = \frac{V(\text{esferoide}) - 1,891}{1,891} 100; \quad V(\text{esferoide}) = 2,021 \text{ m}^3 \quad (3)$$

Este volumen se corresponde con el de una esfera perfecta de radio el que se estimó en lo que sigue:

$$V(\text{esfera}) = \frac{4}{3}\pi r^3; \quad r(\text{esfera}) = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2,021}{4\pi}} \text{ m} = 0,784 \text{ m} \quad (4)$$

Con este resultado se posibilitó el cálculo de la masa de helio con la que se infló el globo:

$$m(\text{He}) = \frac{pVM}{RT}; \quad m(\text{He}) = \frac{9,32 \cdot 10^4 \cdot 2,021 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{8,314 \cdot 293,6} \text{ kg} = 0,3086 \text{ kg} = 308,6 \text{ g} \quad (5)$$

A medida que se fue llenando el globo con el helio de la bombona, se comprobaron en detalle los diferentes equipos y materiales que debían incluirse en el interior de la caja que iría suspendida.

Se comenzó entonces a preparar todo el conjunto que constituiría la sonda. Para ello se dispusieron e inicializaron los diferentes elementos en la caja de acuerdo con el diseño previamente fijado.

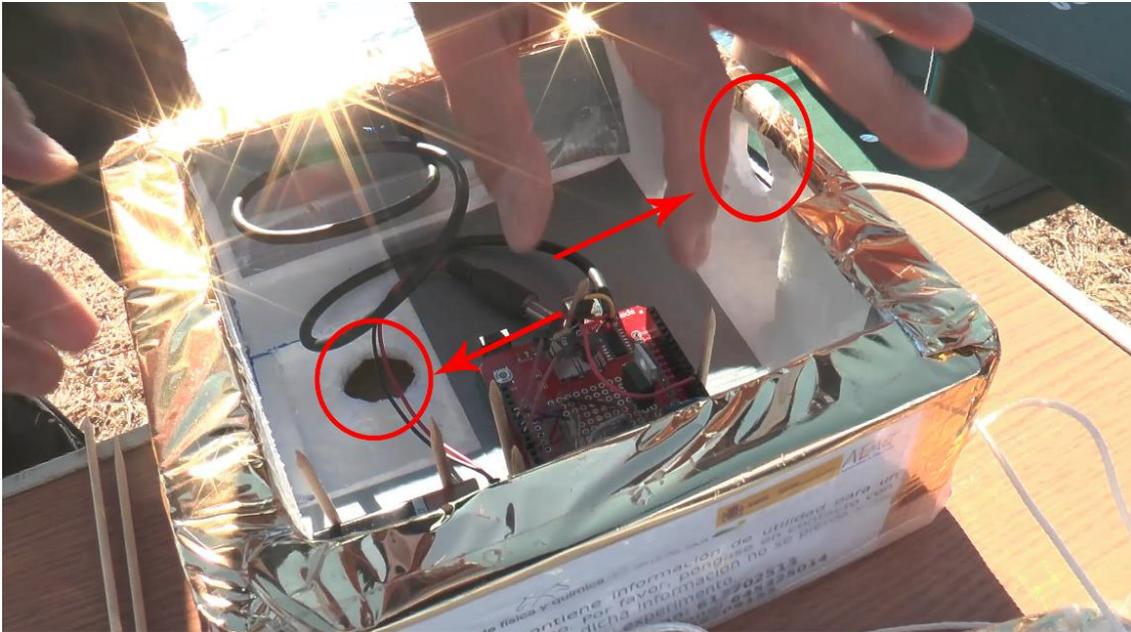


Ilustración 28. Caja portadora con los dispositivos que llevará el globo con la placa Arduino.

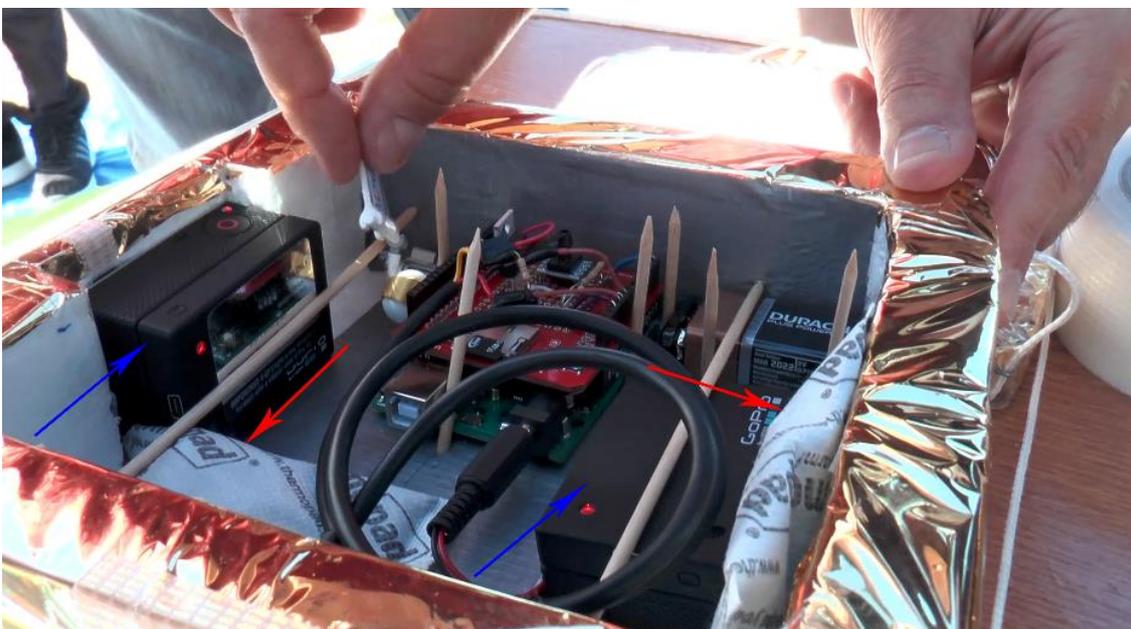


Ilustración 29. Caja con la totalidad de los dispositivos.

En la ilustración 28, se marcan en rojo los orificios practicados para posicionar los objetivos de las cámaras. En la ilustración 29, se ven dispuestos ya todos los dispositivos

y sensores de temperatura y presión. Con flechas rojas se indican los calentadores y azules las cámaras cenital y horizontal.

A continuación, se selló la caja y se dispusieron sobre su superficie los dispositivos localizadores GPS *Spot Gen3*.

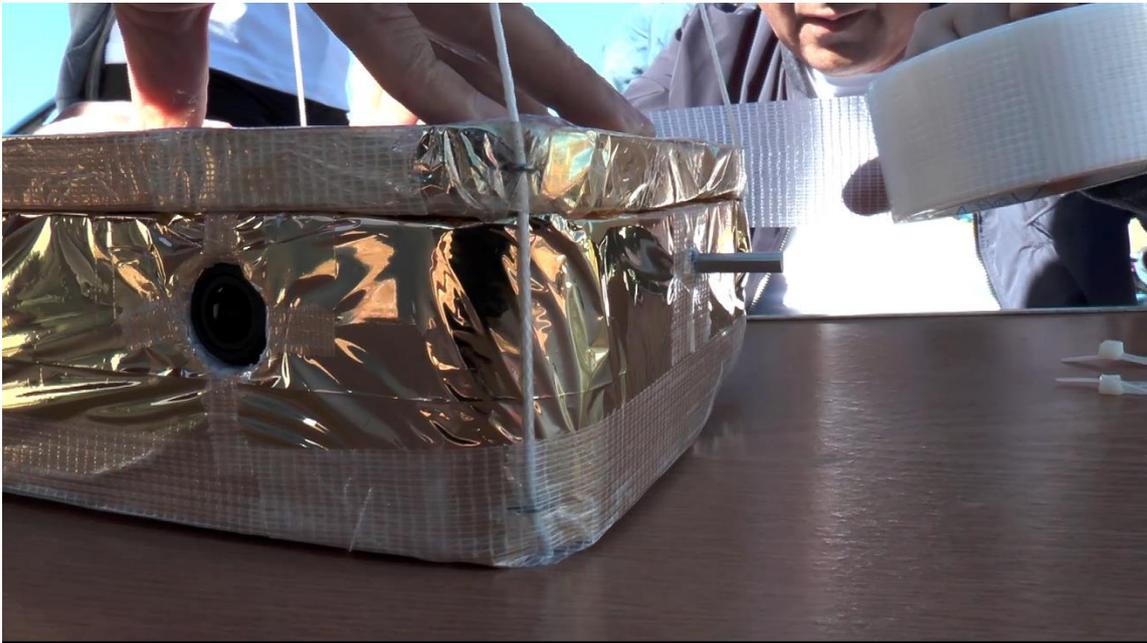


Ilustración 30. Sellado de la caja portadora.



Ilustración 31. Colocación superior e inferior de los dispositivos de localización.

La caja ya sellada y con los dos dispositivos Spot Gen3 adosados a ella, se ancló al conjunto propulsor conformado por el globo y el paracaídas.

Una vez preparado todo se dio paso a las comprobaciones pertinentes previas al lanzamiento del equipo. Así, se constató la seguridad de los elementos de anclaje del globo y también el estado de los equipos y de la caja en la que iban contenidos. Por otro lado, se comprobó la correcta recepción de la información de localización de manera que fuera posible ubicarlo en cada momento del vuelo.

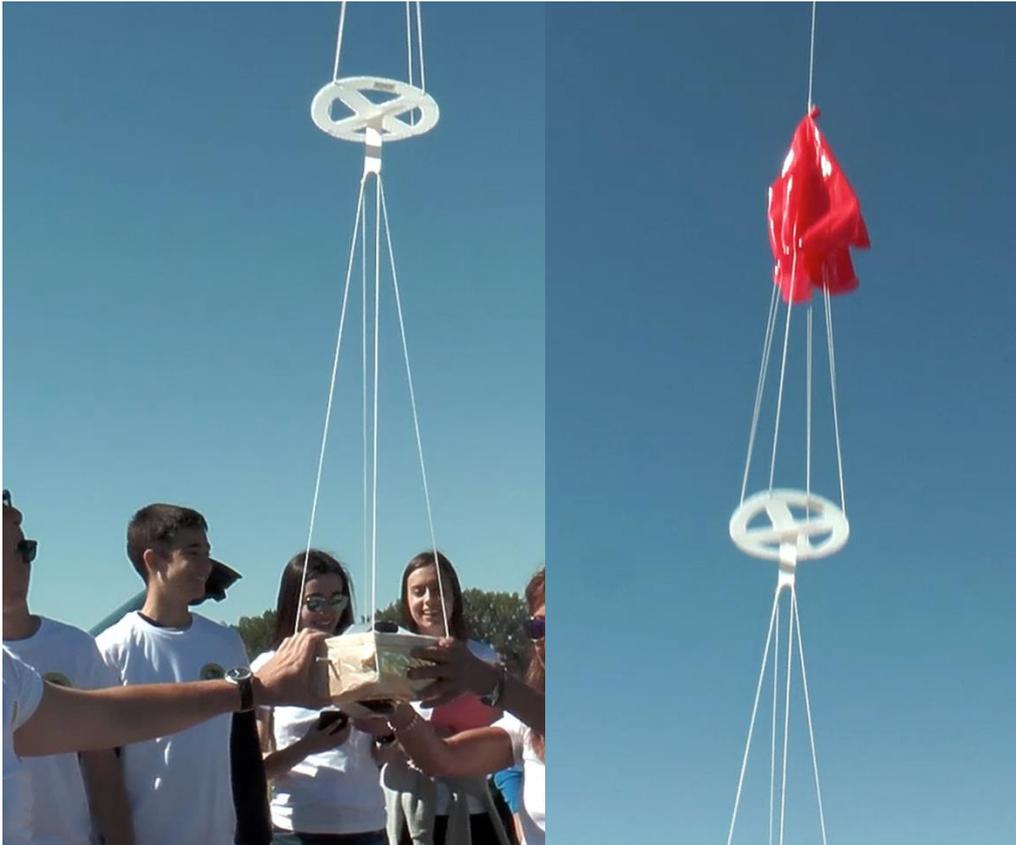


Ilustración 32. Anclaje de la caja portadora al conjunto paracaídas/globo.



Ilustración 33. Comprobación del sellado de la caja y del anclaje del globo.

Lanzamiento del globo

Llegó así el momento crucial y tan ansiado, el del lanzamiento. Este se produjo a las 11:37:28 h, es decir, 28 min y 19 s después del encendido del sistema Arduino. Nos



anticipamos a nuestros cálculos, puesto que habíamos tomado como escenario más probable el lanzamiento pasado el mediodía. Estos valores de tiempo los consideraremos en el momento de deducir los tiempos de estallido, caída libre y vuelo total. Las condiciones en el instante del lanzamiento fueron las siguientes: $h = 795$ msnm; $T = 24$ °C; $p = 931$ hPa. Estas condiciones de presión y temperatura en el instante del lanzamiento, ligeramente diferentes a las del momento de llenado del globo con el helio, derivaron en nuevas estimaciones en lo referente al volumen de la esfera asumida para el globo, así como del radio correspondiente; se consideró en los cálculos que siguen la masa determinada en (5).

$$V(\text{esfera}) = \frac{n(\text{He})RT}{p} \Rightarrow V(\text{esfera}) = \frac{\frac{308,6}{4} \cdot 8,314 \cdot 297}{9,31 \cdot 10^4} \text{m}^3 = 2,046 \text{m}^3 \quad (6)$$

Finalmente, el radio asumido para la esfera correspondiente al globo quedó determinado de acuerdo con lo indicado en (4) y como se explicita a continuación:

$$r(\text{esfera}) = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2,046}{4\pi}} \text{m} = 0,7875 \text{m} \quad (7)$$

Por otro lado, y en lo que tiene que ver con la masa total correspondiente al globo, quedó determinada así:

$$\begin{aligned} m_{\text{total}} &= m_{\text{He}} + m_{\text{látex}} + m_{\text{paracaídas}} + m_{\text{carga útil}} \\ m_{\text{total}} &= (308,6 + 350 + 60 + 756 + 4) \text{g} = 1478,6 \text{g} \end{aligned} \quad (8)$$



Ilustración 34. Momento del lanzamiento del globo.



Desarrollar la actividad: Seguir y buscar el equipo de grabación

El factor tiempo fue fundamental en esta etapa. Era imprescindible tener preparados todos los recursos necesarios para la búsqueda y rescate del equipo. Habíamos recopilado información sobre el entorno para, de esa forma, poder anticiparnos a problemas de accesibilidad. La comarca es poco accidentada y con buenas vías de acceso prácticamente a cualquier punto de los de posible aterrizaje.

Claves

- Control del tiempo
- Eficacia en la comunicación

Posteriormente a la puesta en libertad el equipo se recogió con premura y eficacia todo lo dispuesto con anterioridad para el lanzamiento de modo que el entorno quedase sin huella alguna de impacto ambiental por las tareas realizadas hasta ese instante.

Una vez el globo junto con su carga se encontraban volando y ascendiendo, correspondió hacer su seguimiento. Para esta operación se atendió cuidadosamente a las notificaciones recibidas por el dispositivo móvil que se utilizó como receptor de las ubicaciones emitidas por el localizador GPS del equipo.

Esta operación implicó abandonar el punto de lanzamiento intentando seguir su trayectoria. De acuerdo con nuestras estimaciones y con las realizadas por simulación, habíamos buscado un lugar desde el cual realizar el seguimiento que cumpliera las condiciones siguientes:

- Estar situado lo más próximo posible al lugar de impacto
- Contar con buenas comunicaciones

El lugar elegido fue Melgar de Fernamental, desde el cual iríamos registrando las sucesivas ubicaciones que fueran mandando los equipos de localización y desde donde podríamos efectuar la toma de decisiones que nos posibilitara una rápida recuperación.

La secuencia de mensajes, de acuerdo con nuestros cálculos de ascenso y deriva, nos permitían estimar cuán avanzado estaba el ascenso. Había varios factores que no era posible ponderar con exactitud. El primero es la posible diferencia de la situación meteorológica con la pronosticada por el modelo. Este factor, como ya se ha explicado, se estimaba de bajo impacto al minorar el período de antelación del pronóstico hasta el máximo posible. El segundo factor, mucho menos predecible, era el momento de estallido del globo y, por tanto, de inicio del descenso. La explosión del globo viene determinada por el colapso por expansión de la pared de látex, que queda supeditada a la posible existencia de debilidades e irregularidades que quedarían expuestas únicamente durante esta etapa de la experiencia.

En las imágenes que se muestran a continuación, correspondientes a la recepción de las coordenadas GPS por nuestro dispositivo móvil, puede verse la forma en que se visualizaba dicha trayectoria



Ilustración 35. Visualización de trayectorias a partir de la señales emitidas por los SPOT GEN3.

La disposición geográfica de las señales recibidas se puede ver muy bien en la siguiente imagen. Ésta, muestra la secuencia de las mismas, indicando el probable punto de estallido y el de aterrizaje.



Ilustración 36. Trazado del vuelo completo en 2D a partir de las señales de localización de los dispositivos GPS.



La simulación del lanzamiento realizada a través del CUSF (Cambridge University Spaceflight) de la Universidad de Cambridge con un lanzamiento previsto en torno a las 07:30 UTC, dio como probable zona de aterrizaje el entorno correspondiente a la zona de Melgar de Fernamental, población situada al nordeste de Villada, punto de lanzamiento, y a una distancia de éste por carretera de 71,1 km siguiendo la ruta de la A-231. Como se explica en el [Anexo XII](#), la trayectoria calculada por estima a partir de la consideración del modelo de las 09:00 UTC proponía un punto de aterrizaje algo más al este, en el entorno de Villanueva de Argaño. En este anexo, se analizan las causas de esta diferencia, entre las que la hora del lanzamiento resulta de importancia crucial.

Conocida la trayectoria prevista tal y como se describe más arriba, recogido el material del lanzamiento y realizando el seguimiento de los equipos desde nuestra ubicación en Melgar de Fernamental, sólo quedaba considerar el final de la deriva del globo tras su aterrizaje. Esto era posible determinarlo, en el momento en que la secuencia de desplazamiento registrada por los equipos de localización se detuviera, que se correspondería con la permanencia en reposo sobre la superficie. Sería el momento en el cual era necesario iniciar las tareas de recuperación.



Recuperar la información

Claves

- Actitud abierta al resultado
- Actitud constructiva
- Capacidad de análisis y autocrítica

El momento tan esperado de la recuperación del equipo resultó mucho más fácil de lo previsto puesto que la caja fue recogida por dos trabajadores agrícolas que, siguiendo las indicaciones que se mostraban en el exterior de la misma, llamaron a unos de los miembros del equipo informándonos de su recogida, así como de la ubicación del punto de caída. A partir de ese momento todo resultó tan fácil como dirigirnos hacia la localización indicada por estas personas y recoger de su propia mano nuestro equipo dándolo así por recuperado.



Ilustración 37. Recuperación de la caja portadora con los equipos de grabación, recuperación y medida.

Finalmente recogimos el equipo en los alrededores de Villasandino, población situada muy cerca de la ubicación para el aterrizaje prevista mediante la simulación. Villasandino se encuentra ligeramente al sureste de Melgar de Fernamental y a 13,1 km por carretera (N-120) de dicho núcleo de población.

A partir del momento de recuperación de los equipos, nuestra mayor preocupación e interés se centraba en la comprobación de la correcta grabación y registro de imágenes y datos.

Las primeras comprobaciones “in situ” nos permitieron confirmar que, al menos, las cámaras continuaban grabando, por lo que la duración de las baterías de los equipos había sido suficiente.

Tras desplazarnos de nuevo a Melgar, extrajimos las diferentes unidades de memoria de los equipos de medida y grabación y accedimos a las mismas mediante un ordenador portátil. Nuestra emoción fue considerable al constatar que el comportamiento de los equipos y su estado era muy bueno



De los datos extraídos de los sensores del sistema Arduino y de las grabaciones efectuadas por las cámaras concluimos que el globo junto con el equipo de él suspendido se lanzó desde una altura de 795 msnm y se mantuvo ascendiendo con deriva hacia el nordeste durante 75 min y 38 s, hasta alcanzar 20789 msnm, momento en el que se produjo el estallido. Se inició entonces la caída libre que duró 39 min y 28 s hasta la llegada al suelo situada también, como el lanzamiento, a 795 msnm. El tiempo total que duró el vuelo del equipo fue así de 115 min y 6 s.

En el apartado dedicado a la preparación de los componentes electrónicos ya se explicaron en profundidad los ajustes a los que se sometieron las cámaras y las razones para estos. Por ello no se repiten en esta sección. Las imágenes obtenidas fueron integradas en el documental titulado Proyecto Yuri estrenado en el Ateneo de Santander el 9 de abril de 2019.

Obviamente el material rodado es mucho más extenso que el que se muestra en el citado documental. Ahora interesa destacar el comportamiento real que tuvieron ambas cámaras.

La cámara orientada hacia el horizonte (que registraba imágenes a 30 fps) grabó por un periodo aproximado de 199 minutos de los cuales 27 minutos fueron previos al lanzamiento, unos 115 minutos en el vuelo y 57 minutos después de tocar tierra.

La cámara con orientación cenital (registrando a 50 cuadros por segundo) grabó durante un intervalo aproximado de 183 minutos de los cuales 30 minutos son previos al lanzamiento, 115 minutos en el vuelo y 38 minutos después de tocar tierra.

Se pudo saber (gracias a que las cámaras continuaron con la grabación en el suelo) que la recuperación de los equipos se realizó unos 18 min después del aterrizaje. Se produjo de modo accidental por un grupo de personas que trabajaba en el campo en ese momento, cuyos nombres se recogen en el apartado de agradecimientos.

Finalmente, los volúmenes de los archivos grabados por las cámaras fueron de 35,5 GB para la cámara cenital y de 31,2 GB para la cámara horizontal.

A continuación, se presentan los datos horarios del momento del lanzamiento, instante de la explosión y momento del aterrizaje. Es obvio que la línea de tiempo de la grabación de vídeo permite obtener esos valores con precisión de segundo. Así, se dan estos datos como exactos. Para comparar, reforzar o sacar alguna conclusión, que se comentará más adelante, se muestran también los mismos valores obtenidos a partir del sondeo y del localizador GPS.

Tabla 5. Datos horarios de tiempo de vuelo.

	CÁMARAS	SONDEO	GPS
Hora del lanzamiento (hh:mm:ss)	11:37:28	11:37:28	
Hora explosión (hh:mm:ss)	12:53:06	12:53:11	
Hora aterrizaje (hh:mm:ss)	13:32:34	13:32:31	13:34:19
Tiempo ascenso (s)	4538	4543	
Tiempo descenso (s)	2368	2359	
Tiempo total (s)	6906	6902	



Los datos se presentan referenciados a la hora local, dado que la hora de lanzamiento era conocida con exactitud. Simplemente se han sumado los segundos correspondientes a cada caso y convertido al formato horario.

En cuanto a los datos del sondeo se considera como hora de la explosión la que corresponde con la mínima presión (máxima altitud) y hora del aterrizaje la que comienza a ofrecer valores constantes de la presión.



Ejecutar Plan de contingencia

El diseño del Plan de contingencia quedó definido de forma lo más concreta posible. Ciertamente, la limitación de medios y la multiplicidad de causas sólo permitían una posible secuencia de tareas que permitieran repetir la experiencia.

El elemento de disparo de dicho plan de contingencia sería doble:

- Imposibilidad de recuperación del equipo
- Imposibilidad de recuperación de los datos e información captada.

En ambos casos, sería necesario valorar dos opciones:

- Repetir la experiencia.
- Dar por finalizada la misma y extraer las conclusiones a partir de la no consecución de los objetivos propuestos.

Imposibilidad de recuperación del equipo

El orden de acciones a seguir sería el siguiente:

- a. Valorar la capacidad presupuestaria para reponer los equipos
- b. Valorar la disponibilidad de los participantes en el proyecto para volver a intentarlo
- c. Determinar en lo posible la causa de la no recuperación (fallo de equipos, vandalismo, accidente, etc.)
- d. Valorar la posibilidad técnica (meteorológica, logística, administrativa, etc.) de repetir la experiencia
- e. De ser posible, reiniciar el proceso general a partir de la elección de localización del lanzamiento

Imposibilidad de recuperación de los datos e información

En este caso, la secuencia sería la que viene a continuación:

- a. Determinar la causa técnica que ha imposibilitado la recuperación de datos e información
- b. Valorar la disponibilidad de los participantes en el proyecto para volver a intentarlo
- c. Valorar la posibilidad técnica (meteorológica, logística, administrativa, etc.) de repetir la experiencia
- d. De ser posible, reiniciar el proceso general a partir de la elección de localización del lanzamiento

En nuestro caso, se recuperaron tanto los equipos, como hemos visto, como la información recogida por los mismos. Lógicamente, no fue necesario activar el plan de contingencia.



Editar el vídeo y archivar la información

Gran parte de los recursos temporales, económicos y humanos fueron dedicados a este apartado de la experiencia. Supone un valioso resultado por varias razones fundamentales:

- Por un lado, la elaboración del vídeo documental, nos ha aproximado al ámbito de la comunicación y la producción artística, aportando al proyecto un enfoque interesante y enriquecedor.
- Además, la posibilidad de contar con un elemento divulgativo tan potente, ha permitido compartir los resultados más allá de los límites del equipo y despertar en otras personas y colectivos inquietudes nuevas e interés hacia el ámbito científico.
- Por último, la ingente cantidad de información, en forma de datos e imágenes, dan soporte a las conclusiones extraídas de la experiencia. En cierta manera, dan sentido y consistencia a todo el trabajo realizado.

Edición del vídeo

Entre los propósitos iniciales del proyecto estaba documentar audiovisualmente al máximo todas las fases del mismo. Esto implicó cierta complejidad organizativa y, por ello, se planificó el trabajo de forma que lo posibilitara.

De igual forma, se trató de maximizar la calidad audiovisual del vídeo editado con la experiencia. Para dicha tarea, se contó con la participación profesional de la productora Ruido Interno, con amplia experiencia en la producción en artes audiovisuales.

Gracias a la excelente disposición y buen criterio de sus miembros, en particular de Juan Carlos Fernández Izquierdo, hemos conseguido de forma rápida una sintonía y entendimiento que nos ha permitido ejecutar prácticamente todas las tareas programadas en los plazos previstos y, simultáneamente, realizar la grabación de las imágenes necesarias para el documental.

Resultó particularmente interesante y divertido aproximarse al campo del rodaje documental, conjugando las tareas del propio proyecto con las propias del rodaje. En ningún momento la grabación de las imágenes ha afectado al rigor de los ensayos y, al mismo tiempo, éste ha conseguido reflejar fiel y dinámicamente cada perspectiva de los mismos.

La posterior edición, montaje e inserción de música ha sido laboriosa y dilatada y ha exigido un notable y exitoso esfuerzo por parte de la productora. La implicación de Ruido Interno y su plena asunción de los principios del proyecto, han dado como resultado un magnífico documental que resume y presenta muy bien el desarrollo, la ejecución y algunas conclusiones claves del proyecto.

Archivo de la información generada

Los cálculos, registros, datos e informaciones, diarios con tareas e incidencias y documentos que se generaron, se guardaron de forma digital para servir de evidencia de las actividades.



Se conservan, igualmente, todos los documentos y comunicaciones que se han ido generando y que marcan la necesaria trazabilidad del proyecto. En lo posible, se han ido compartiendo y agrupando para constituir un repositorio lo más completo posible, pero dada la complejidad del proceso de ejecución del proyecto, se conservan en buena medida por cada una de las partes implicadas.

En esta memoria, tal y como se comenta en otros capítulos, se incluyen tablas, esquemas y datos resumidos de los cálculos y resultados obtenidos. En casi todos los casos, se trata de extractos de volúmenes de información muy grandes y cuya inclusión completa es imposible y sin sentido. Sí se conservan en integridad para cualquier consulta o comprobación posterior y, además, como posible punto de partida para posteriores estudios.



Redactar la Memoria de la actividad

La redacción de la memoria final, se ha realizado siguiendo un esquema similar al empleado en la memoria justificativa. De hecho, se ha procurado conservar la estructura de epígrafes, pero, en vez de figurar las tareas como las previstas, figuran tal como realmente se ejecutaron.

Para la elaboración de esta memoria final, resulta imprescindible haber llevado al día un registro de actividades, una tarea habitual en multitud de entornos académicos y de trabajo: laboratorios, puestos operativos, contabilidades, gestión, investigación. De esa forma, no se ha perdido ni distorsionado ninguna de las experiencias y es posible sacar las debidas conclusiones.

Las tareas de redacción de los contenidos técnicos se han repartido entre los autores del proyecto, en cada área de conocimiento, conservando cada uno la libertad de detallar y exponerlos de acuerdo a su criterio, aunque siempre coordinadamente, para dar coherencia al conjunto y facilitar la lectura. Hemos decidido conservar incluso el estilo narrativo de cada autor en cada una de las partes que haya podido elaborar, sin renunciar a la coherencia del discurso y procurando adaptar lo imprescindible la redacción para facilitar la lectura. Es por eso en la que es patente la diferente mano en la elaboración, especialmente si se consideran algunos bloques separadamente. El resultado, en nuestra opinión, es igualmente compacto y más rico en matices y puntos de vista.

La intención y propósito final de este documento es formar un bloque compacto que sirviera de repositorio central de toda la información generada durante el proyecto. Aunque no incluya la ingente cantidad de datos producidos y almacenados en otros soportes y bases de datos de diferentes formatos (vídeos, imágenes, datos de variables medidas, localizaciones, etc.) ni tampoco los originales de documentos necesarios para la ejecución del proyecto (permisos, facturas, etc.), sí se hace referencia a los mismos en su contexto, incluyendo agrupaciones en tablas e imágenes representativas de ellos

Como es obvio, en la memoria final del proyecto, se han incluido las conclusiones extraídas de la experiencia, clasificadas como se ve en el apartado correspondiente.

También se recoge una bibliografía en la cual se relacionan las fuentes documentales que sustentan el trabajo científico y técnico.



Presentar y promover el proyecto

La elaboración del material audiovisual y la de la memoria final posibilitan la presentación del proyecto de manera que se comuniquen y compartan, no sólo las experiencias sino también las conclusiones.

De acuerdo con este propósito final de compartición del conocimiento y experiencia adquiridos, se proyecta la puesta a disposición en un futuro del documental producido. Se trataría de una versión digital del mismo accesible a través de internet, de una forma aún sin definir al redactar esta memoria.

La muestra y estreno público del mismo, sin embargo, sí se ha realizado en varias ocasiones.

La primera de las mismas se realizó el 22 de febrero de 2019 en la Casa de Cultura de la localidad palentina de Villada que, como hemos dicho, fue el escenario del lanzamiento. Acudimos únicamente los autores del proyecto ante la imposibilidad de que participaran por cuestiones laborales y estudiantiles el resto del equipo. Se trató de un pase publicitado únicamente en dicha localidad y realizado en consideración al magnífico trato dispensado por los vecinos y autoridades. Fue también una oportunidad muy buena de calibrar el efecto de la compartición del proyecto con gente ajena a la ejecución del mismo. Percibimos un vivo interés por él y durante el coloquio realizado tras el visionado del documental, recibimos numerosos comentarios positivos y pudimos atender y explicar los pormenores de la experiencia respondiendo sus numerosas preguntas.

El segundo visionado público del documental, se realizó el 9 de abril de 2019 en el Ateneo de Santander. Participamos la totalidad del equipo del proyecto con la única ausencia de una de las alumnas, en esas fechas estudiando fuera de Cantabria. También hubo una amplia presencia institucional (Consejería de Educación del Gobierno de Cantabria, Ayuntamiento de Villada, Universidad de Cantabria y Agencia Estatal de Meteorología), entidades colaboradoras (Textil Santanderina, Meteorológica, Ruido Interno) y otros colaboradores del proyecto que han participado a título individual, entre los que cabe una mención especial para los recuperadores de los equipos, que se desplazaron específicamente para la ocasión desde Burgos.

Se realizó una promoción del mismo a través de las redes sociales y fue enfocada al entorno educativo y científico, aunque la convocatoria era totalmente abierta a cualquier tipo de oyente.

De hecho, esta sesión resultó un éxito de participación, completando el aforo del auditorio (alrededor de 200 localidades) y quedando gran cantidad de gente a las puertas por no poder acceder al interior. La recepción y valoración del público fue también muy positiva y fue notable el interés despertado en la audiencia.

La notable acogida de esta convocatoria propició la planificación de otra posterior que diera una oportunidad de ver el documental y de intercambiar impresiones con los autores del proyecto. Se programó y efectuó el 29 de mayo de 2019 en la Sala Casyc-UP de Santander, con capacidad para 110 espectadores. En esta ocasión, en la que prácticamente hubo un aforo completo, acudieron numerosas personas pertenecientes al ámbito



científico regional, con representantes de la Universidad de Cantabria, Instituto Español de Oceanografía y Aemet, entre otros.

Tras el visionado del documental se generó un interesante coloquio con la activa participación del público y con valiosos aportes sobre diversos enfoques del proyecto que hemos recogido con agradecimiento y satisfacción.

En fechas futuras, es muy posible que se programen más actos de proyección comentada del documental dada la gran cantidad de solicitudes que continuamos recibiendo, por parte de instituciones públicas y privadas.

De cualquier manera, la naturaleza del proyecto determina su exposición y acceso de forma general por medio de internet, a través de una vía que no está fijada en el momento de la redacción de esta memoria.

ANEXO I: La atmósfera terrestre

Desde la etapa inicial del proyecto, se hizo evidente la necesidad de formar a los alumnos sobre las particularidades del entorno en el cual se iba a desarrollar la parte más crítica de la experiencia. Al finalizar una primera aproximación teórica, el alumno tendría asimilados ciertos conceptos importantes entre los cuales estarían:

- La atmósfera tiene una estructura tridimensional que es necesario conocer. Además de su doble dimensión horizontal, de la cual se tiene una natural e intuitiva noción, existe otra vertical de gran importancia y de cuyas especiales características depende el éxito o no del proyecto.
- La altitud condiciona la presión atmosférica y, por lo tanto, otras variables como la temperatura y el volumen se ven afectadas en virtud de las leyes físicas que las relacionan. Por lo tanto, el alumno ha de conocer la relación entre densidad, presión y volumen.
- Es posible prever con buena aproximación la evolución de estas variables a medida que nuestros equipos progresen verticalmente. El alumno conocerá ésta a partir de la atmósfera estándar y de observaciones atmosféricas realizadas en el entorno de la futura experiencia.

La atmósfera estándar

Las condiciones en la superficie terrestre varían notablemente en el tiempo y en el espacio. Desde las latitudes extremas hasta el Ecuador, pueden darse en un mismo instante una disparidad de muchos grados en la temperatura en superficie. Asimismo, la presión atmosférica en superficie, función del peso de la columna de aire que gravita sobre un punto y, por lo tanto, a su vez función de su altura y densidad, varía notablemente desde unos puntos a otros y también a lo largo del tiempo¹².

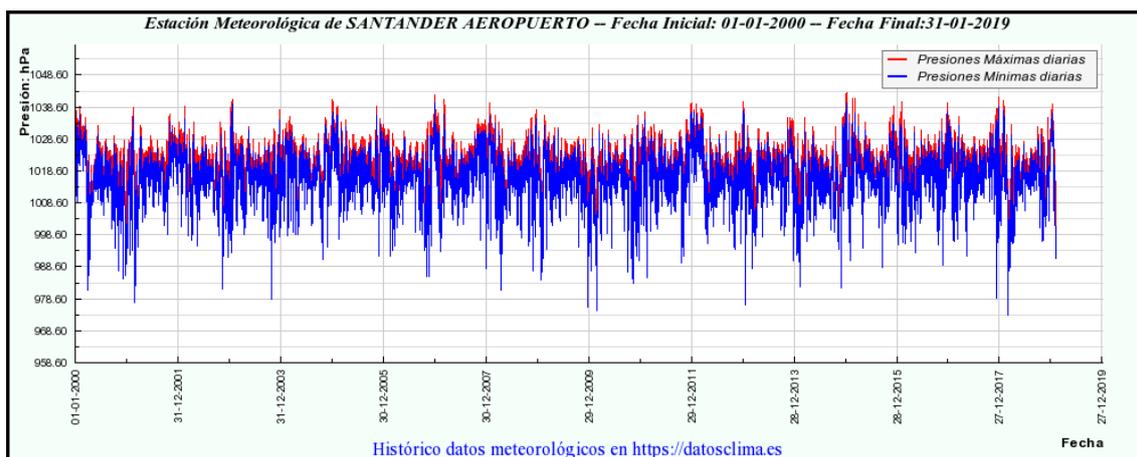


Ilustración 38. Evolución de la Presión en el Aeropuerto de Santander entre 2000 y 2019. Fuente: Aemet, 2019

¹² Por ejemplo, la presión atmosférica máxima registrada a nivel del mar en el aeropuerto de Santander entre los años 2000 y 2019 ha sido de 1043,0 hPa mientras que la menor presión registrada en el mismo período ha sido de 988,9 hPa (Aemet, 2019).

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha creado un modelo invariante, denominado International Standard Atmosphere ISA (ISO, 2007) que supone una atmósfera promedio para todas las latitudes y épocas del año. Es de utilidad a la hora de normalizar cálculos, calibrar instrumentos y realizar experiencias en laboratorio. Se utiliza de forma generalizada en aeronáutica en materia de altimetría y aerodinámica.

Este modelo, divide su estructura en capas y define una serie de variables: la presión, temperatura, densidad y viscosidad en función de la altitud. Tan sólo apuntaremos muy concisamente algunos de sus detalles, fundamentalmente para las capas inferiores, troposfera y estratosfera, en las cuales se desarrolló la experiencia.

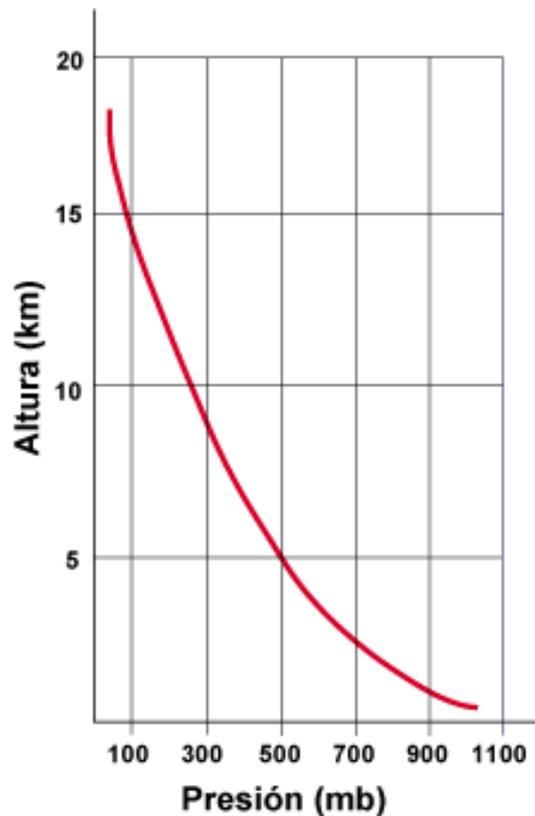


Ilustración 39. Relación entre presión y altitud. Fuente: OACI

Por la propia definición de la presión atmosférica, ésta decrece con la altitud, razón por la cual es tradicionalmente utilizada como referencia altimétrica. Las diferencias de presión se corresponden con diferencias en altitud. En el gráfico de la derecha, se aprecia la relación entre ambas variables en el modelo de la ISA. También para nosotros la medida de la presión ha resultado imprescindible para estimar la altitud a la cual podíamos referenciar cada medida de temperatura registrada o cada imagen grabada.

Es importante añadir que, en aquellos momentos en los que no se cuente con datos directos de observación para realizar nuestros cálculos, hemos recurrido a ella. Se da la ventajosa circunstancia de que la atmósfera estándar representa, a grandes rasgos, la situación en latitudes medias para el equinoccio, lo cual se ajusta bastante a nuestras condiciones previstas para el lugar y fecha del lanzamiento. Las desviaciones con respecto a ella no son, por tanto, de magnitud significativa.

En la tabla adjunta, se incluyen los valores de gradiente de temperatura, presión y densidad para las diferentes altitudes sobre el nivel del mar.

Capa	Altura Geométrica (msnm)	Gradiente vertical de temperatura (K/km)	Temperatura en la base (K)	Presión en la base (hPa)	Densidad en la base (kg/m ³)
Troposfera	0,0	-6,5	288,15	1013,25	1,2250
Tropopausa	11019	0,0	216,65	226,32	0,3639
Estratosfera	20063	+1,0	216,65	54,749	0,0880
Estratosfera	32162	+2,8	228,65	8,6802	0,0132

Tabla 6. *Atmósfera estándar. Valores para capas inferiores. Fuente ISO.*

A modo ilustrativo, incluimos un perfil extraído de un sondeo, para fechas próximas a la del lanzamiento (1 de agosto de 2018), de forma que se pueda hacer una comparación con el gráfico propuesto por la ISA a bajo nivel.

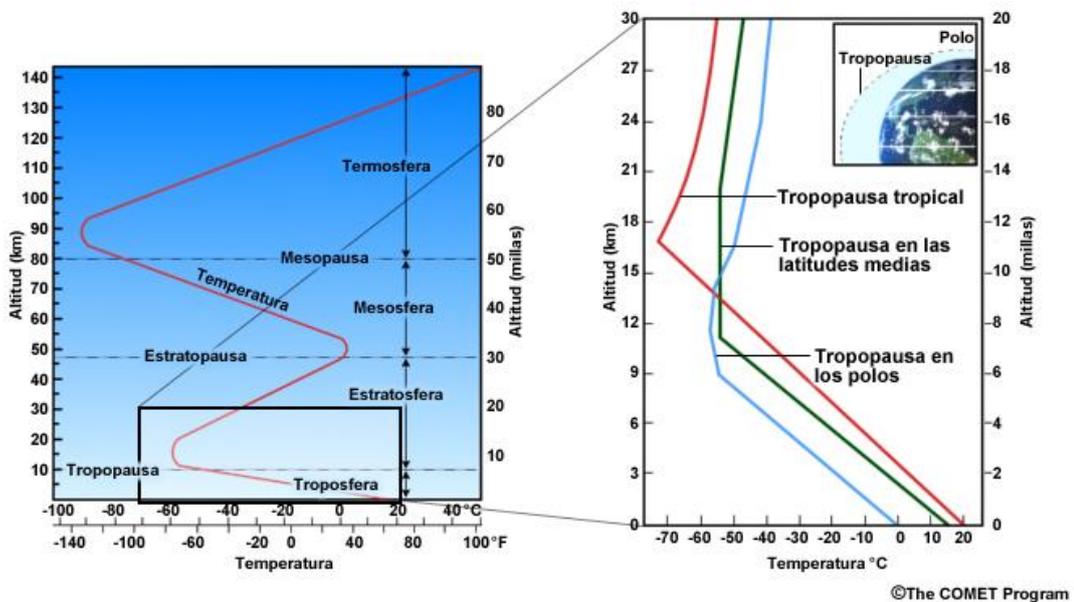


Ilustración 40. *Perfiles de temperatura para la altitud en niveles inferiores de la atmósfera ISA. Fuente: The Comet Program*

En la imagen de la derecha, se puede ver trazado en color verde el gráfico para latitudes medias con el perfil de temperaturas que corresponde prácticamente con el del modelo ISA.



Más abajo, mostramos el diagrama del sondeo de las 12:00 UTC del día 1 de agosto de 2018. En el mismo, en trazo rojo continuo, se ve la evolución vertical de la temperatura, apreciándose un mínimo en el entorno de los 12.000 metros sobre los -60°C que se mantiene con muy poca variación hasta los 16.950 metros mostrados en el gráfico

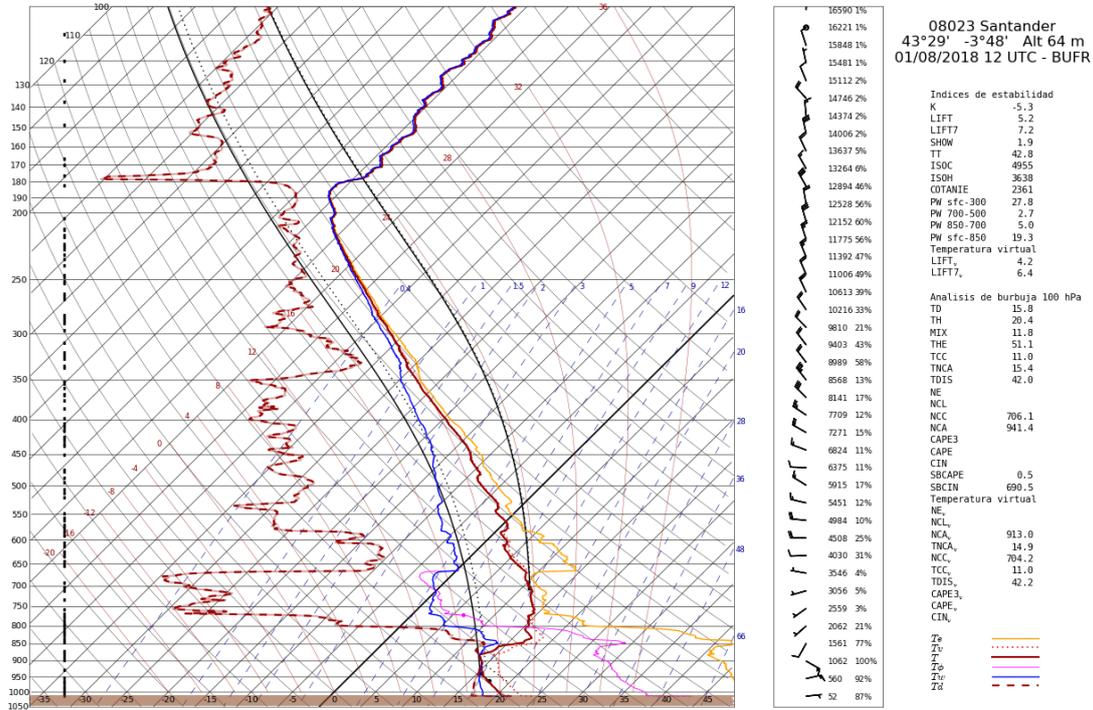


Ilustración 41. Diagrama del sondeo del Observatorio de Santander de las 12 UTC del día 1 de agosto de 2019. Fuente: Aemet

En base a estas consideraciones sobre la troposfera y la baja estratosfera se han realizado los cálculos necesarios para la preparación del lanzamiento.

ANEXO II: Aerostatos

Los globos meteorológicos suelen estar hechos de un material de látex de gran flexibilidad y utilizar gas helio por tratarse de un gas más ligero que el aire y por su inercia química. Elevan instrumentos en la atmósfera para suministrar información acerca de la presión atmosférica, la temperatura, la humedad, la dirección y velocidad del viento, la concentración de ozono... Algunos de los datos se consiguen mediante rastreo por radar o a través de localización por radiofrecuencia o sistemas como GPS. En general, los equipos de medición utilizados en meteorología son desechados.

Los globos meteorológicos se han lanzado en todo el mundo para realizar observaciones de las condiciones atmosféricas en tiempo real, así como para efectuar modelos numéricos de predicción del tiempo. En la actualidad, se lanzan rutinariamente en aproximadamente 800 lugares distintos del mundo, dos veces al día, por lo general a las 00:00 UTC y a las 12:00 UTC. Pueden alcanzar una altura de 40 km o más, altura limitada por la disminución de la presión que causa que el globo se expanda hasta el límite de elasticidad del látex del que está hecho, momento en el que estalla y se desintegra.

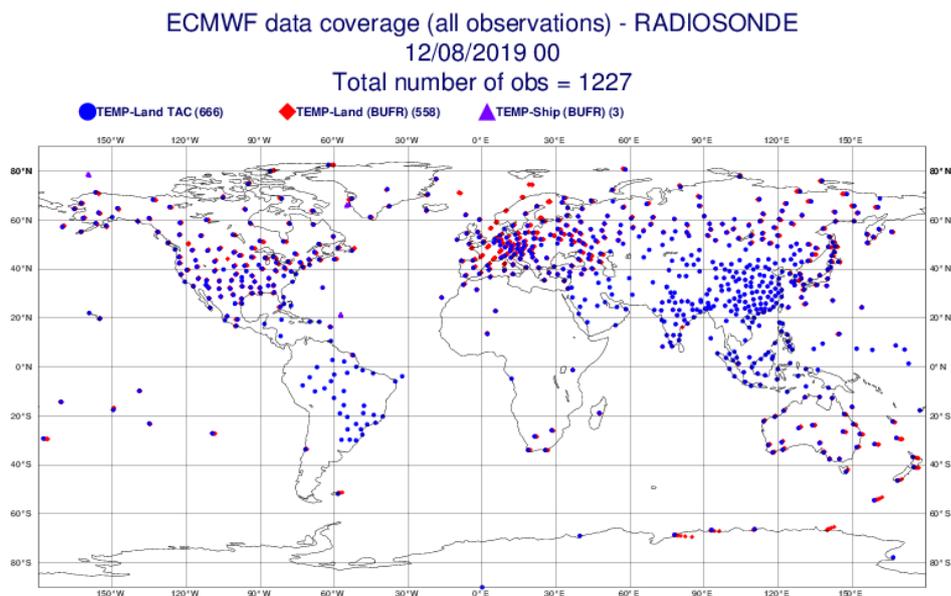


Ilustración 42. Cobertura mundial de observaciones aerológicas. Fuente: ECMWF.

El globo sonda que se utiliza en meteorología es, por tanto, un globo aerostático, normalmente relleno de helio, que se encarga de elevar una radiosonda en la atmósfera desde la superficie hasta altitudes que rondan los 25 kilómetros. En su recorrido se realiza una observación de variables meteorológicas en la vertical de la atmósfera como la presión, temperatura, humedad y viento, por medio de una radiosonda cuyas mediciones son transmitidas continuamente a una estación, donde se genera un gráfico de perfil atmosférico vertical de las variables medidas. La radiosonda posee medios radioeléctricos para la transmisión de los registros medidos. A través de una antena de radiofrecuencia y un receptor GPS se reciben los datos de la sonda en los equipos electrónicos del radio-sondeo. El receptor GPS se utiliza para localizar automáticamente como mínimo tres satélites de la red GPS (Sistema de Posicionamiento Global) de los que recibe unas



señales indicando la posición y el reloj de cada uno de ellos. Conociendo además las coordenadas o posición de éstos por la señal que emiten, se obtienen la posición absoluta o las coordenadas reales del punto de medición. En meteorología, se usa la tecnología GPS para identificar la posición del radio-sonda durante la realización de un radio-sondeo. Las velocidades de ascenso del globo sonda, suelen variar entre 4 y 7 m/s. El globo al ascender e ir alcanzando presiones más bajas termina por explotar, momento en el que finaliza el sondeo y cae a tierra la radiosonda. A veces se le pone un paracaídas para ralentizar la caída.

Para la ejecución de este proyecto se ha utilizado un globo igual a algunos de los utilizados en meteorología, concretamente como los que emplea la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en los sondeos atmosféricos que realiza diariamente.

La diferencia de nuestro lanzamiento con los globos sonda de AEMET, radica en los siguientes aspectos y elementos:

- El equipo de instrumentos que ha portado ha incluido dos cámaras situadas en posiciones cenital y horizontal, respectivamente, para la grabación de imágenes durante la trayectoria.
- Las variables meteorológicas no se han medido mediante radiosonda sino mediante sensores conectados a un dispositivo electrónico sustentado en una placa Arduino.
- Las variables meteorológicas medidas han sido la presión y la temperatura.
- La posición del globo y la de todo el sistema que traslada se ha determinado merced a dos localizadores Spot Gen 3. Éstos son dispositivos de localización que utilizan el sistema GPS, pero, a diferencia de otros dispositivos GPS, la información que reciben a través de los satélites comerciales la envían hasta unos servidores de pago donde dicha información se procesa y se envía a un teléfono móvil. En meteorología el sistema GPS se utiliza para determinar la velocidad del viento a través de la trayectoria que sigue la sonda, pero no emplean esos datos para conocer dónde está la sonda y, así, predecir dónde va a caer o perseguirla.
- Todo lo que el globo ha trasladado se ha recuperado puesto que, por una parte, el disponer de las imágenes grabadas, así como de los resultados correspondientes a las variables meteorológicas y de sus valores a diferentes alturas han constituido algunos de los objetivos fundamentales del proyecto; por otra, el impacto ambiental en el entorno elegido para el lanzamiento del globo ha resultado nulo.



Ilustración 43. Radio-sonda y Conjunto Globo/paracaídas/radiosonda. Fuente: Aemet.



ANEXO III: Tratamiento formal del movimiento de un globo en la atmósfera

Dadas las características de los globos utilizados para sondeos en altitud resulta inmediato hacer dos consideraciones:

- La geometría del globo (esferoide) hace que el rozamiento que experimenta sea en más de un 90% arrastre aerodinámico (Smith, 2010) y además esté caracterizado por una dependencia cuadrática de la velocidad. Esto se puede dar por seguro cuando los números de Reynolds son superiores a 1000, valor que, como se verá más adelante, se supera en todo el proceso en varios órdenes de magnitud.
- Con los valores de carga de Helio que se muestran en el apartado dedicado a la metodología, se obtienen unos empujes tales que se alcanza la velocidad terminal casi de inmediato. Por tanto, el globo se desplaza en todo momento en régimen de velocidad terminal, a pesar de que esta sea cambiante como se ve en el desarrollo de este epígrafe.

Una vez alcanzada la velocidad límite el globo se encuentra en un equilibrio dinámico que se puede resumir en la siguiente ecuación:

$$E = W + F_d \quad (1)$$

en la que E designa el empuje aerostático, W el peso del globo con su carga útil y F_d la resistencia o arrastre aerodinámico. A su vez, E y F_d quedan determinados por las ecuaciones,

$$E = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g \quad (2)$$

$$F_d = \frac{1}{2}C\rho v^2\pi r^2 \quad (3)$$

en ambas expresiones se asume, por el momento, el carácter esférico del globo, tanto para evaluar su volumen en la determinación del empuje como para incluir el área de la superficie enfrentada al avance en el “rozamiento” aerodinámico.

r representa el radio del globo, ρ la densidad de la atmósfera, g la aceleración de la gravedad, v la velocidad vertical de ascenso del globo y C el denominado coeficiente aerodinámico. Llevadas ambas expresiones a la ecuación (1) se tiene una primera expresión para la velocidad de ascenso del globo,



$$v = \left(\frac{8rg}{3C} - \frac{2W}{C\pi\rho r^2} \right)^{1/2} \quad (4)$$

El objetivo consiste en tener expresiones de las velocidades o el tiempo de ascenso referidos a la altitud dado que, gracias a los sensores de presión que transporta el globo, esta magnitud quedará muy bien caracterizada. Así pues, se deben expresar las dos variables de (4) en función de la altitud. Dichas variables son obviamente $r(h)$ y $\rho(h)$.

En atmósfera lineal

Podemos introducir en la expresión de la densidad de un gas ideal (2 del [Anexo V](#)) la ecuación de la presión en una atmósfera lineal (6 del [Anexo V](#)) y la de caída lineal de temperatura (5 del [Anexo V](#)) para dar,

$$\rho = \frac{P_0 M}{R(T_0 - Lh)} \left(1 - \frac{Lh}{T_0} \right)^{\frac{gM}{RL}}$$

Para obtener una expresión más compacta y manejable hacemos el siguiente agrupamiento renombrando algunas magnitudes,

$$\left(1 - \frac{Lh}{T_0} \right) = x ; \quad \frac{gM}{RL} = A$$

Se llega a,

$$\rho = \rho_0 x^{A-1} \quad (5)$$

Con $\rho_0 = P_0 M / RT_0$ representando la densidad de la atmósfera en el punto inicial o de lanzamiento.

En cuanto al radio, se tiene que a partir de la ecuación del volumen de la esfera, la ecuación de los gases ideales y la expresión (6 del [Anexo V](#)) para una atmósfera lineal

$$r^3 = \frac{3nRT}{4\pi P} = \frac{3nRT_0 x}{4\pi P_0 x^A} = \frac{3V_0}{4\pi} x^{1-A} = r_0^3 x^{1-A} \Rightarrow r = r_0 x^{\frac{1-A}{3}} \quad (6)$$

r_0 representa el radio del globo en el instante del lanzamiento.

Puede verse cómo el efecto de disminución de la temperatura y de disminución de la presión compiten en la expresión anterior para decidir si hay aumento o no del radio durante el ascenso. Dado que x es siempre un número menor que la unidad, y cada vez más pequeño, elevado a un número negativo el resultado es que el radio del globo aumenta durante el ascenso en la atmósfera lineal.



Una vez que se tienen expresiones de densidad (5) y radio (6) en función del parámetro x , y por tanto de la altitud, se puede obtener una fórmula para la velocidad de ascenso del globo referida a la altura,

$$v = \sqrt{\left(\frac{8r_0g}{3C} - \frac{2W}{C\pi\rho_0r_0^2}\right)x^{\frac{1-A}{3}}} = kx^{\frac{1-A}{6}} \quad (7)$$

donde se define k como todo el factor constante

$$\left(\frac{8r_0g}{3C} - \frac{2W}{C\pi\rho_0r_0^2}\right)^{1/2}$$

que representa la velocidad de ascenso del globo en el instante del lanzamiento.

Resulta oportuno llamar la atención sobre una cuestión poco intuitiva. A pesar de que tanto la densidad del medio como el radio del globo son variables, no lo es el empuje. Basta con un breve desarrollo de la expresión (2) con las relaciones (5) y (6) para ver,

$$E \propto r^3\rho = r_0^3x^{1-A}\rho_0x^{A-1} = r_0^3\rho_0 = cte$$

si el empuje es constante y, obviamente, el peso también, entonces debe serlo el arrastre aerodinámico. Un desarrollo de la expresión (3) lleva de inmediato a la siguiente relación,

$$F_d \propto x^{\frac{A-1}{3}}v^2$$

al ser x una variable que disminuye con la altura esto implica que la velocidad debe aumentar a medida que el globo asciende.

En atmósfera isoterma

En este caso $T=T_0$ ya que se supone que en esa región la temperatura se mantiene invariable. Además la presión evoluciona según la relación 4 del [Anexo V](#), con todo ello se obtiene la dependencia del radio con la altitud en este tipo de atmósfera,

$$V = \frac{nRT}{P} = \frac{nRT}{P_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}} = V_0 e^{\frac{Mgh}{RT}} \Rightarrow r = r_0 e^{\frac{Mgh}{3RT}} \quad (8)$$

Por otra parte resulta inmediato comprobar cómo a partir de la ecuación de la densidad de un gas ideal se llega a,



$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} \quad (9)$$

Al igual que en el caso anterior se insertan las relaciones (8) y (9) en la ecuación (4), resultando,

$$v = \sqrt{\left(\frac{8r_0g}{3C} - \frac{2W}{C\pi\rho_0r_0^2}\right) e^{\frac{Mgh}{3RT}}} = k' e^{\frac{Mgh}{6RT}} \quad (10)$$

Donde $k' = \left(\frac{8r_0g}{3C} - \frac{2W}{C\pi\rho_0r_0^2}\right)^{1/2}$ representa la velocidad en el comienzo de la zona isoterma.



ANEXO IV: Sobre el coeficiente aerodinámico

El estudio del rozamiento aerodinámico es una cuestión de enorme complejidad y que descansa en el conocimiento profundo de la dinámica fluidos. En cualquier caso, todas las situaciones requieren de un estudio particular, siendo muy difícil la generalización y el establecimiento de leyes precisas. Normalmente, todas las fórmulas son de carácter empírico y dependientes de parámetros ajustables en pruebas de laboratorio. Aun así, conviene recordar algunas cuestiones básicas.

Lo que aquí se llama rozamiento aerodinámico (drag en los textos de habla inglesa) no es un rozamiento como tal. De hecho, se le diferencia del rozamiento debido al deslizamiento entre superficies al que se le otorga, más correctamente, el término fricción.

Es verdad que ambos están presentes en cualquier movimiento de un sólido en el seno de un fluido pero en el caso de una esfera se estima que el porcentaje de rozamiento debido a la fricción entre superficies está por debajo del 10% siendo mayoritariamente un efecto aerodinámico.

El mal llamado “rozamiento” aerodinámico se debe a las fuerzas generadas por diferencias de presión en las capas de fluido que envuelven al cuerpo, de modo singular en la capa límite y en la estela. Aunque en última instancia todo podría explicarse en base a la ecuación de Bernoulli, la complejidad que genera la geometría del cuerpo, el material de la superficie y el régimen (casi siempre) turbulento hace que no quede más remedio que ajustar empíricamente en túneles de viento y humo muchos de los parámetros implicados. Solo las geometrías muy simples y en régimen laminar permiten establecer resultados más precisos.

El número de Reynolds es un factor adimensional y que relaciona las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Se determina a través de la expresión,

$$R_e = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (1)$$

En el que ρ representa la densidad del fluido, D el diámetro de la esfera, v la velocidad de avance del cuerpo en el fluido y μ la viscosidad dinámica del fluido.

Cuando este número es muy pequeño (menor que la unidad) la fuerza aerodinámica es prácticamente proporcional a la velocidad y se enuncia mediante la conocida ley de Stokes,

$$F = 6\pi\mu Rv \quad (2)$$

Esta expresión suele funcionar muy bien para partículas pequeñas que se mueven muy lentamente como polvo en suspensión o microorganismos en el agua. En el resto de casos el rozamiento es mayoritariamente cuadrático con la velocidad y para una gran variedad de situaciones se rige por la ecuación 3 del [Anexo III](#). El problema de esta ecuación es

que el parámetro C (coeficiente aerodinámico) no tiene un valor exacto y no queda más remedio que recurrir a curvas experimentales que muestran su evolución. Lo que se percibe en todas ellas es la fuerte dependencia que presenta este coeficiente con el número de Reynolds. Esto queda perfectamente reflejado en artículos mucho más profundos (On the rise and fall of a ball with linear or quadratic drag, 1999). En todas las gráficas se percibe la denominada “drag crisis” o crisis de arrastre en la que la capa límite del fluido pasa de turbulenta a laminar. En ese momento la estela se vuelve más ancha (NASA, 2019) y aumenta notablemente el valor del coeficiente aerodinámico o, lo que es lo mismo, se incrementa la fuerza de rozamiento. La zona de capa límite turbulenta, se sitúa en los valores altos del número de Reynolds (por encima de 10^6) mientras que la crisis se produce en algún valor del Re situado entre $3 \cdot 10^5$ y $4 \cdot 10^5$. De modo simplificado sería como muestra la siguiente gráfica:

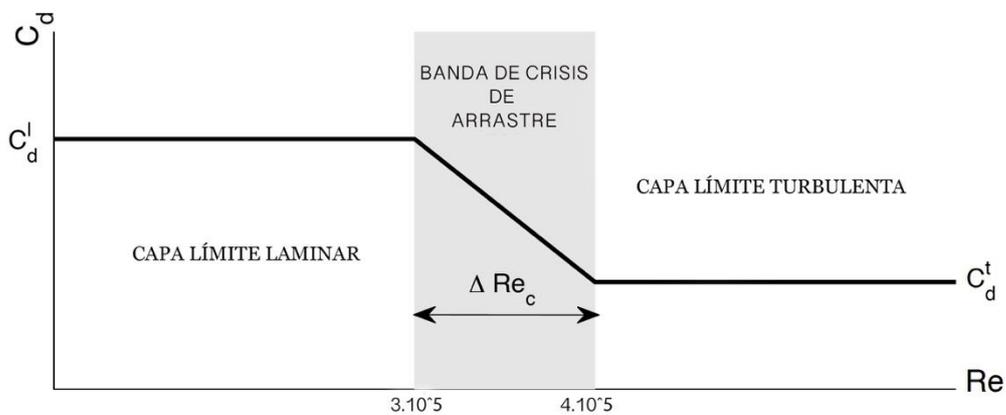


Ilustración 44. Variación del coeficiente aerodinámico con el número de Reynolds



ANEXO V: Derivaciones sobre las fórmulas barométricas

Derivación de la fórmula barométrica en atmósfera isoterma

Se entiende por atmósfera isoterma aquella en la que la temperatura permanece constante en todos sus puntos o, al menos, presenta unas variaciones tan poco significativas que permite considerarla uniforme. Estarían en este caso los estudios verticales entre puntos muy próximos entre sí o regiones donde se detiene el descenso térmico como la tropopausa.

Cualquier movimiento vertical en el seno de un fluido como la atmósfera estará gobernado por la ecuación fundamental de la hidrostática,

$$P = \rho gh \quad (1)$$

Donde P representa la presión absoluta, ρ la densidad del fluido, g la aceleración de la gravedad y h una coordenada de altura dentro del fluido.

Por otra parte, y considerando a la atmósfera como un gas ideal, deberá cumplirse,

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (2)$$

en la que M representa la masa molar del gas, R la constante de los gases ideales y T la temperatura absoluta. Si se toma como origen de alturas la superficie de la tierra y diferenciando (1) se tiene,

$$dP = -\rho g dh$$

si se combina con (2) se llega a:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{gM}{RT} dh \quad (3)$$

si se asume que $T = \text{cte}$ se integra la ecuación del siguiente modo,

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = -\frac{gM}{RT} \int_0^h dh$$

se llega sin dificultad a la expresión que aparece en los textos en la que P_0 representa el valor de la presión en el punto considerado como inicial.

$$P = P_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} \quad (4)$$

Resulta inmediato la obtención de la altura en la fórmula anterior,



$$h = \frac{RT}{Mg} \ln \frac{P_0}{P} \quad (4bis)$$

Derivación de la fórmula barométrica en atmósfera lineal

En lo sucesivo, se denominará atmósfera lineal a la que asume que existe una tasa lineal constante de disminución de la temperatura con la altitud. Su consideración será especialmente correcta y necesaria en el estudio de grandes desplazamientos verticales dentro de la troposfera.

Dicha disminución queda explicitada en la siguiente relación:

$$T = T_0 - Lh \quad (5)$$

en la que T_0 representa la temperatura de partida en un determinado nivel, T la temperatura a una altura h sobre el nivel inicial y L la tasa de enfriamiento que se establece por término medio en 0,0065 K/m.

Si se lleva esta relación a (3) se tiene:

$$\frac{dP}{P} = \frac{gM}{R(Lh - T_0)} dh$$

se hace el cambio de variable $Lh - T_0 = u$ y se integra entre $h=0$ y $h=H$:

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = \frac{gM}{RL} \int_{-T_0}^{LH - T_0} \frac{du}{u}$$

se llega sin dificultad a:

$$P = P_0 \left(1 - \frac{Lh}{T_0} \right)^{\frac{gM}{RL}} \quad (6)$$

De igual modo que en el caso anterior se puede llegar sin demasiada dificultad a una fórmula para la altitud,

$$h = \frac{T_0}{L} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{RL}{gM}} \right]$$

(6bis)



ANEXO VI: Deducción del tiempo de ascenso de un globo en la atmósfera

En atmósfera lineal

La velocidad de ascenso de un globo en una atmósfera lineal queda determinada por la relación 7 del [Anexo III](#). Resulta casi inmediato obtener el tiempo por integración de la velocidad,

$$v(h) = \frac{dh}{dt} \Rightarrow \int_0^H \frac{dh}{v} = \int_0^t dt$$

$$dh = -\frac{T_0}{L} dx$$

$$-\frac{T_0}{Lk} \int_1^{1-\frac{LH}{T_0}} x^{\frac{A-1}{6}} dx = \int_0^t dt \Rightarrow t = \frac{6T_0}{Lk(A+5)} \left[1 - \left(1 - \frac{LH}{T_0} \right)^{\frac{A+5}{6}} \right]$$

(1)

En atmósfera isoterma

En una atmósfera isoterma se procede de un modo similar al mostrado en el caso anterior. A partir de la fórmula de la velocidad,

$$v(h) = \frac{dh}{dt} \Rightarrow \int_0^t dt = \int_0^H \frac{dh}{v} \Rightarrow t = \frac{1}{k'} \int_0^H e^{-\frac{Mgh}{6RT}} dh \Rightarrow t = \frac{6RT}{Mgk'} \left[1 - e^{-\frac{MgH}{6RT}} \right]$$

(2)

en la que k' representa la velocidad al comienzo de la zona isoterma.



ANEXO VII: Presupuesto del Proyecto

Como ya dijimos antes, la financiación económica es una parte de la colaboración que ha sido necesaria para la realización del proyecto. Lo incluido a continuación, es un desglose de los gastos incurridos y de las aportaciones de todo tipo que han sido efectivas durante la ejecución del mismo. No existen grandes diferencias con lo presupuestado inicialmente, aunque fue inevitable cierto ajuste sobre lo planificado.

Sobre el presupuesto final, se apuntan las cantidades inicialmente no consignadas o consignadas con una cuantía mal estimada. En cada caso se incluyen comentarios en otro color.



Tabla 7. Presupuesto del proyecto

Concepto/Colaborador	Importe gasto	Cuantía/forma de la aportación
Textil Santanderina S.A.		----
Meteorológica		----
Consejería Educación Gob. Cantabria		---- (no inicial)
Aemet		Globo y anclaje paracaídas
Placa Arduino + sensores + otros componentes electrónicos	----	
Aduana (Arduino)	----	
Spot Gen3 (2)	-----+-----= ----	
Baterías externas + Tarjetas microSD	----	
Contrato Spot Gen3 (2)	2x----= ---- (no inicial)	
Batería interna	--	
Cámara Gopro 5 Hero Black (2)	----x2= ---- (no necesario)	
Pack de alimentación portátil (2)	---x2= ---- (no necesario)	
Calentadores de mano para electrónica (3)	----	
Botella de helio	----	
Hielo seco en Pellets (5 kg)	----	
Caja Porexpan	----	
Tarjeta de memoria de 64 GB	----	
Productora de vídeo Ruido interno	----	
Nitrógeno líquido	----	



ANEXO VIII: Cálculos durante la sesión en la DT Aemet en Cantabria.

Los cálculos realizados a partir de la toma de datos efectuada durante los ensayos previos, fueron los que se explicitan a continuación:

$$\rho_{gas} = \frac{p_{gas} M_{gas}}{RT} \quad (1)$$

De acuerdo con la ecuación (1):

$$\rho_{aire} = \frac{1015,88 \cdot 10^2 \cdot 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{8,314 \cdot 291,2} = 1,216 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{aire} = \frac{1018,6 \cdot 10^2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{8,314 \cdot 291,2} = 0,168 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_{esfera} = \frac{4}{3} \pi r_{esfera}^3 \quad (2)$$

De acuerdo con la ecuación (2) el volumen correspondiente a una esfera de radio el medido para el globo es:

$$V_{esfera}(\text{globo}) = \frac{4}{3} \pi \cdot 0,751^3 \text{ m}^3 = 1,774 \text{ m}^3$$

De la diferencia de lecturas de masas se deduce el valor de la fuerza ascensional a la que se encontraría sometido el globo en el caso de que no llevara suspendido ningún lastre:

$$\begin{aligned} F_{asc} &= [\text{lectura balanza (lastre)} - \text{lectura balanza (globo inflado + lastre)}] \times g = \\ &= P_{lastre} - P_{lastre} - P_{He} - P_{látex} + E = E - P_{He} - P_{látex} \end{aligned} \quad (3)$$

De acuerdo con la ecuación (3):

$$F_{asc} = (3018,1 - 1387) \times 10^{-3} \times 9,8 \text{ N} = 15,985 \text{ N}$$

$$F_{asc} = E - P_{He+látex} = V_{globo} g (\rho_{aire} - \rho_{He}) - P_{látex} \quad (4)$$

De la ecuación (4) se deduce:

$$V_{globo} = \frac{F_{asc} + P_{látex}}{g(\rho_{aire} - \rho_{He})} \quad (5)$$

A partir de la ecuación (5), y teniendo en cuenta que la masa del látex es de aproximadamente 361 g, se determina:

$$V_{real}(\text{globo}) = \frac{15,985 + 0,361 \cdot 9,8}{9,8 \cdot (1,216 - 0,168)} \text{ m}^3 = 1,900 \text{ m}^3$$



$$m_{He} = \rho_{He} V_{real}(globo) \quad (6)$$

De acuerdo con la ecuación (6):

$$\begin{aligned} m_{He} &= 0,168 \cdot 1,900 \text{ kg} = 0,319 \text{ kg} \\ E &= F_{asc} + P_{He+látex} = \rho_{aire} V_{globo} g \end{aligned} \quad (7)$$

Según la ecuación (7):

$$E = 15,985 \text{ N} + (0,361 + 0,319) \times 9,8 \text{ N} = 22,64 \text{ N}$$

El valor correspondiente a la masa de helio permite calcular la presión que el gas ejerce en el interior del globo:

$$p(He) = \frac{n(He)RT}{V} \quad (8)$$

De acuerdo con la ecuación (8):

$$p(He) = \frac{\frac{319}{4} \cdot 8,314 \cdot 291,2}{1,900} = 1016,20 \cdot 10^2 \text{ Pa}$$

Se determina con este resultado el incremento en la presión respecto a la del exterior y que corresponde a la ejercida por el látex que conforma el globo:

$$\Delta p(\%) = \frac{1016,20 - 1015,88}{1015,88} 100 = 0,03\%$$

En lo referente a la esfericidad del globo se comprueba que el incremento porcentual en su volumen real respecto al de la esfera correspondiente al radio medido para él es del 7,1 %. Esta diferencia se debe a que la geometría del globo no es esférica, sino que se aproxima más a la de un esferoide:

$$\Delta V(\%) = \frac{1,900 - 1,774}{1,774} 100 \cong 7,1\%$$

En la imagen que se muestra a continuación se observa la forma del globo y su alejamiento de la geometría esférica.



Ilustración 45. Imagen que muestra el alejamiento de la esfericidad del globo durante la sesión en Aemet.

Posteriormente la imagen del globo fue sometida al tratamiento y análisis con el software matemático GeoGebra derivándose de ello una vez más el cálculo de su volumen real a través de este procedimiento.

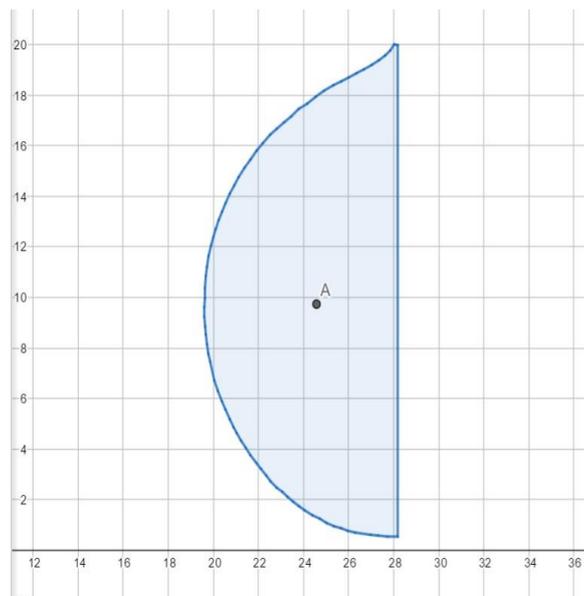


Ilustración 46. Sección de la fracción de un esferoide representativo de la forma del globo, trazado mediante el programa Geogebra

De acuerdo con el programa GeoGebra las coordenadas de los puntos que conforman el esferoide representativo de la forma del globo dan como resultado:

Área = 124,166 unidades

Radio = 3,6 unidades

Coordenadas del baricentro: (24,58 , 9,736) unidades

Estos resultados conducen al siguiente valor para el volumen del esferoide y, por tanto, para el volumen real del globo:



$$V = 2\pi RA; \quad V \cong 2808,5688 \text{ unidades}$$

El volumen de la esfera correspondiente es:

$$V \cong 2627,3014 \text{ unidades}$$

Previamente el programa había determinado que el radio de la esfera superpuesta era de 8,56 unidades.

Comparando ambos valores se calcula el siguiente incremento en el volumen real del globo respecto al ocupado por una esfera perfecta:

$$\Delta V(\%) = \frac{2808,5688 - 2627,3014}{2627,3014} 100 \cong 6,9\%$$

Resultado que se constata muy similar al del 7,1% obtenido a partir de la medida experimental de la fuerza ascensional.

ANEXO IX: Determinación del lugar del lanzamiento

Desde las primeras etapas del proyecto, dada nuestras restricciones técnicas y económicas, resultó claro que no podríamos llevarlo a cabo utilizando sistemas que permitieran la captura de datos e imágenes de forma remota. Además, la idea no era repetir experiencias que habitualmente se realizan de forma profesional sino encontrar, entre todos, soluciones asequibles y viables. Éstas pasaban por recuperar los equipos de medición y grabación que enviáramos a la estratosfera.

Por un lado, la recuperación de los equipos minimizaría el impacto medioambiental, de por sí pequeño dada la entidad de los equipos, al no dejar abandonadas en el entorno baterías y componentes diversos.

Recuperar el equipo pasaba por controlar la trayectoria, y este control implicaría considerar cuidadosamente el lugar y momento del lanzamiento.

Respecto al momento del lanzamiento, dentro de la horquilla de fechas disponibles, habría de decidirse, como se verá en el [Anexo XI](#), en base a consideraciones meteorológicas.

En lo posible, el escenario del aterrizaje debería ser accesible, con buenas comunicaciones y alejado de entornos urbanos grandes. La experiencia, consultada por aficionados al rastreo de radio-sondeos, como Jesús Iparraguirre, antiguo jefe del observatorio de Igueldo de Aemet, nos permite conocer dos cosas:

- Aproximadamente el 60% de los radio-sondeos enviados desde el Observatorio de Santander caen en el Mar Cantábrico. Aquellos que se desplazan al interior, en condiciones predominantes de circulación del norte, se precipitan con gran probabilidad en entornos de montaña de muy difícil acceso.
- Por otro lado, con vientos predominantes del norte, la nubosidad de estancamiento es muy común (Aemet, 2019), dificultando de manera muy difícil de cuantificar la obtención de imágenes de calidad.

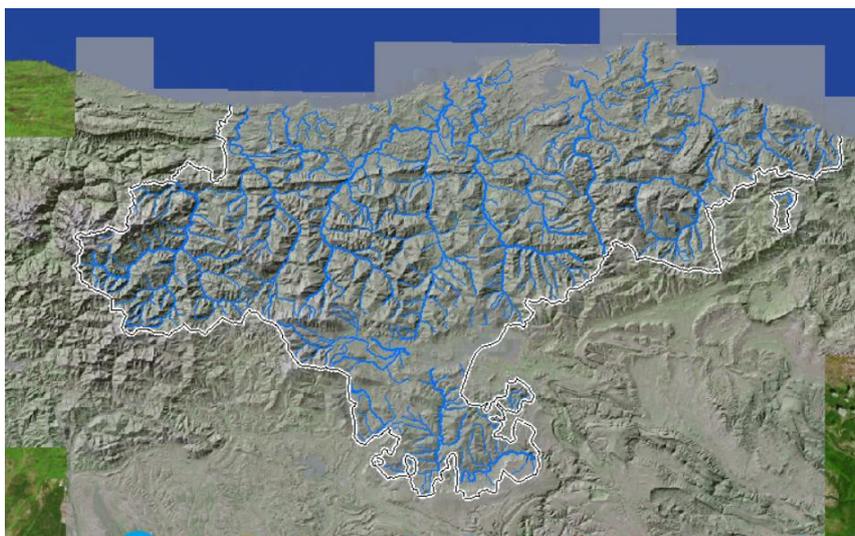


Ilustración 47. Visualización orográfica de Cantabria y su entorno. Fuente: Gobierno de Cantabria (mapas.cantabria.es)

Existía además otro factor importante a tener en cuenta. El espacio aéreo es un ámbito regulado y la actividad en el mismo está sujeta a restricciones que garantizan la seguridad del tráfico aéreo. Existen dos tipos de servidumbres asociadas a esta regulación. Una determina los límites de las actividades en los entornos aeroportuarios de forma que estas no afecten a las operaciones de aproximación, aterrizaje y despegue. Otro tipo de limitación determina las vías aéreas que conectan los diferentes orígenes y destinos, a altitudes en las cuales nuestros equipos van a desplazarse.

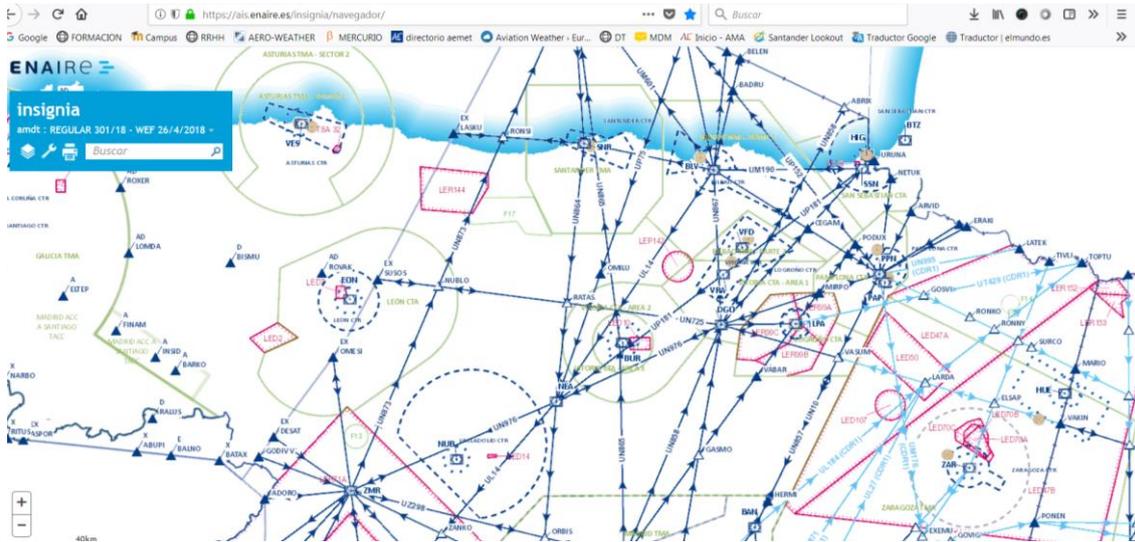


Ilustración 48. Servidumbres aéreas en la mitad norte de España. Fuente: Enaire

A través de la aplicación Insignia de Enaire (Insignia, 2018), se pueden consultar en detalle dichas servidumbres. De acuerdo con ella y buscando aunar los criterios que anteriormente hemos mencionado, se decidió fijar el lugar del lanzamiento en Villada (Palencia) en los alrededores de la Ermita de la Virgen del Río.



Ilustración 49. Coordenadas del punto de Lanzamiento en Villada. Fuente: SIGPAC



ANEXO X: Elección de fechas probables y solicitud de permisos

De forma bastante clara, nuestros respectivos calendarios y las disponibilidades para realizar el lanzamiento apuntaban a los meses de verano, preferentemente agosto, para poder establecer una horquilla temporal suficientemente amplia. Se trataba de contar con suficiente margen para poder estudiar las condiciones meteorológicas en un período de tiempo y con antelación razonable.

Por otro lado, existían importantes razones técnicas para elegir el período estival. De los valores normales de las diferentes estaciones de las comunidades de Castilla y León y de Cantabria (Aemet, 2018), se pudieron extraer datos importantes que ayudaron a tomar decisiones con respecto a las fechas idóneas para realizar el lanzamiento.

Sumada a la bajísima probabilidad de nieblas para esos meses de verano en toda la meseta, siendo prácticamente nulo, por ejemplo, en los aeropuertos de Burgos o León, y muy bajo en el de Valladolid, las horas de sol registradas en los mismos dan una idea de la probable presencia de nubosidad en esas fechas con respecto a otras épocas del año. En la tabla adjunta, se pueden comparar los valores de insolación para los meses de mayo, julio y agosto de los aeródromos de Santander, León, Valladolid y Burgos.

Tabla 8. Valores normales de horas de sol

<i>Media de Horas de sol totales mensuales</i>	<i>Aeródromos</i>			
	<i>Burgos</i>	<i>León</i>	<i>Valladolid</i>	<i>Santander</i>
<i>Meses</i>				
<i>Mayo</i>	226	259	272	172
<i>Julio</i>	320	358	363	187
<i>Agosto</i>	292	327	334	180

La unión de los dos factores: el meteorológico y el ocupacional, nos ayudó a definir el período entre los días 2 y 10 de agosto de 2018, como el del posible lanzamiento.

El siguiente paso hubo de ser solicitar permiso a la autoridad competente para realizar nuestra actividad. Esa autoridad es el Departamento de Coordinación Operativa del Espacio Aéreo, de Enaire, a través de su Dirección de Operaciones. Puestos en comunicación con ellos y ateniéndonos a sus instrucciones y consejos, evitando solicitar el permiso con excesiva antelación, cursamos la solicitud el día 4 de julio de 2018, detallando la localización, alcance, duración y características de nuestro lanzamiento.



El día 20 de julio de 2018, recibimos contestación positiva a nuestra solicitud junto con las instrucciones que debíamos seguir el día del lanzamiento, así como el NOTAM editado por la citada autoridad, avisando al tráfico aéreo del mismo.

Con media hora aproximadamente de antelación, habríamos de llamar telefónicamente al Supervisor de Madrid ACC para coordinar la actividad y, a la finalización o si había alguna incidencia, comunicarlo por igual cauce. Adjuntamos los documentos de solicitud y permiso.



ENAIRe

SOLICITUD DE ACTIVIDAD AÉREA CIVIL RELATIVA A OTROS USOS DEL ESPACIO AÉREO

* A RELLENAR POR EL SOLICITANTE
** A RELLENAR POR EL COP

FECHA* 4 julio 2018

REFERENCIA DEL SOLICITANTE* YUR12018

REFERENCIA ANTERIOR* REFERENCIA ENAIRe**

1. Solicitante.
Nombre: CARLOS FERNÁNDEZ FREIRE
Dirección: URBANIZACIÓN SAN LORENZO S. CASAR DE PERIEDO 39591 (CANTABRIA)
Teléfono: 942704052
Móvil: 617702513
Correo Electrónico: cfernandez@acmet.es

2. Naturaleza de la actividad.
 Láser / Focos.
 Fuegos Artificiales.
 Suelta de Faraolillos.
 Suelta de Globos.
 Sondeos Meteorológicos.
 Globos Cautivos.
 Publicidad.
 Pasajeros.
 Fotografía y Filmación.
 Área Segregada Temporal.
 Publicada en el AIP (identificación y nombre):
 Por Motivos de Seguridad para Acontecimiento Público o Privado:
 Otros: Sondeo meteorológico experimental. Colaboración entre Aemet (Cantabria) e IES Valle del Saja.

3. Declaración de Autorización.
Por la presente designo y autorizo a CARLOS FERNÁNDEZ FREIRE a actuar como representante en la tramitación de este formulario de solicitud de permiso, y coordinador de la actividad aeronáutica a realizar, pudiendo aportar, si se requiere, la información suplementaria necesaria.
Firma del Organizador
ALBERTO AGUAYO DÍAZ (Departamento de Física y Química I.E.S. Valle del Saja)

4. Fechas de la Actividad.
Fechas: Entre los días 2 y 10 de agosto a.i. Se elegirá el día en función de las condiciones meteorológicas.
Horarios (Indicar si es Hora Local o UTC): De los 09:00 H.L. (lanzamiento) a 11:00 H.L. (aterrizaje)
Duración de la Actividad: 120 minutos aproximadamente entre el lanzamiento y el aterrizaje.

5. Zona de Trabajo y Características de la Actividad (sistema de referencia WGS-84. Coordenadas geográficas).
Municipio y Provincia: Villada, provincia de Palencia

A. Tipo de Zona (en grados, minutos y segundos. Indicar longitud este u oeste. Añadir tantos puntos como sea necesario).
 Área circular / Punto / Polígono / Trayectoria.

Latitud	42°15'00"	Longitud	4°57'30"	<input checked="" type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E	Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E
Latitud	42°27'30"	Longitud	4°25'00"	<input checked="" type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E	Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E
Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E	Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E
Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E	Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E
Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E	Latitud		Longitud		<input type="checkbox"/> W / <input type="checkbox"/> E
Radio	_____ m		_____ Km		_____ m		_____ Km		

B. Altura sobre el Terreno (AGL) o Altitud sobre el Nivel del Mar (AMSLL).
Indicar unidad y tipo: 22.000 _____ m / _____ AGL / _____ AMSLL

C. Otros Datos: Los puntos especificados describen la trayectoria entre lanzamiento y aterrizaje

6. Características de la Actividad (información adicional para las siguientes actividades).
 A. Sondeos Meteorológicos.
Tipo de sonda: Ligero / Medio / Pesado.
Diámetro máximo del globo: 4.13 m Peso de la sonda / globo: 0.7/0.4 Kg
Color del globo: rosa Número de globos: 1
Regimen de ascenso: 5.1 m/s Regimen de descenso: 5 m/s

B. Suelta de Faraolillos / Suelta de Globos.
Número de globos: _____ Diámetro: _____ Color: _____

C. Láser / Focos.
Barrido horizontal del haz (Entre 0° y 360°): _____
Barrido vertical del haz (Entre la horizontal 0° y 90°): _____

D. Otros Datos: El equipo está configurado sin elementos estructurales rígidos ni materiales duros.

7. Declaración de Conformidad.
Declaro que:
1. La información contenida en este formulario, así como la documentación adjunta, es real, verdadera y correcta.
2. Cuenta con la habilitación necesaria para poder someter la actividad solicitada.
3. El personal y/o medios materiales empleados para realizar la actividad cumple con la normativa vigente así como con los requisitos establecidos por la DGAC (Dirección General de Aviación Civil) / AISA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea)

Firma _____
Carlos Fernández Freire

Remite a:
ENAIRe
Dirección de Operaciones / GCAT
Dpto. Coordinación Operativa del Espacio Aéreo (COP)
Avenida de Aragón 402
Edificio Lameña, 4ª Planta
28022 Madrid
Teléfono: 913 213 378
Correo Electrónico: cop@enaire.es

Ilustración 50. Solicitud de permiso de actividad en Espacio Aéreo

ENAIRe

Origen

De: Dpto. de Coordinación Operativa de Espacio Aéreo Fecha: 20/07/2018

Unidad: Dirección de Operaciones / GCAT / COP Páginas: 2

T: 913 213 378 E: cop@enaire.es

Destino

Empresa: I.E.S. VALLE DEL SAJA

A la atención de: ALBERTO AGUAYO DIAZ / CARLOS FERNANDEZ FREIRE

REF: 2066
ASUNTO: SONDEO EN VILLADA (PALENCIA)

En contestación a su solicitud de fecha 16 de julio de 2018 (Su ref. YUR12018), se informa que como resultado del estudio realizado para la ejecución de los trabajos, se tendrán en cuenta las siguientes condiciones operativas:

- 30 minutos antes de la suelta del globo deberá coordinar con el Supervisor de Madrid ACC en el teléfono 916 785 101/916 566 596.
- Este escrito no les exime del cumplimiento de cualquier otra normativa existente para dichas actividades tanto de ámbito nacional como autonómico o local, especialmente aquellas relacionadas con normativa medioambiental.
- Se notificará al Departamento de Coordinación Operativa (cop@enaire.es) la finalización y/o cancelación de los trabajos aéreos solicitados, así como cualquier modificación que alterase las condiciones en las que fueron coordinados.

enaire.es P. 1 de 2

NOTAM:
(D2338/18 NOTAMN
QILECM/QWLLW/M/M /W /000/722/4215N00457W001
AILECM/81808020700 C18080100900
D10700-0900
ERADIOSOUNDING. ASCENT OF FREE METEOROLOGICAL LIGHT BALLOONS ON
421500N 0045730W
PALENCIA/VILLADA
BALLOONS FEATURES
TYPE: SPHERICAL
COLOUR: PINK
DIAMETER: 4.13M
SOUNDING WEIGHT: 1.1KG
ASCENSIONAL SPEED: 5.1M/S
FALLING SPEED: 5M/S
MAXIMUM ALTITUDE: 22000M AMSL
FISFC G12200M AMSL)

- Periodo de validez entre el 2 y el 10 de agosto de 2018 de 09:00 a 11:00LT

Saludos,
Vicky González Otón.
Jefa Dpto. Coordinación Operativa del Espacio Aéreo

enaire.es P. 2 de 2

Ilustración 51. Autorización de Enaire para la actividad.

ANEXO XI: Elección de la fecha de lanzamiento

Durante los días previos a la horquilla autorizada para el lanzamiento, estuvimos al tanto de las condiciones meteorológicas que se iban a dar. Para ello, hicimos uso de opciones de acceso a información abierta. Nuestro propósito no era aquí recurrir a productos técnicos específicos sino aprovechar aquellos cuya utilización es común, que son servidos regularmente y que son debidamente solventes¹³.

Para nosotros, esta elección tiene el valor añadido de ayudarnos a conocer y entender la información meteorológica disponible de diversas fuentes y tener en cuenta sus alcances y fiabilidades. Por referenciar estos productos someramente, citaremos las salidas de los modelos numéricos del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo y del Global Forecast System de la NOAA, y los pronósticos generales del tiempo de Aemet. Unos y otro nos permitirían estimar las trayectorias probables y descartar escenarios con episodios severos o incluso poco adecuados para el lanzamiento.

La necesidad sobrevenida de realizar pruebas de última hora de funcionamiento de equipos electrónicos a muy bajas temperaturas, efectuadas en laboratorio con nitrógeno líquido como se puede ver en el desarrollo del proyecto y que se efectuaron el día 6 de agosto, obligaron a acotar la horquilla temporal al período entre el día 7 y el 10 de agosto.

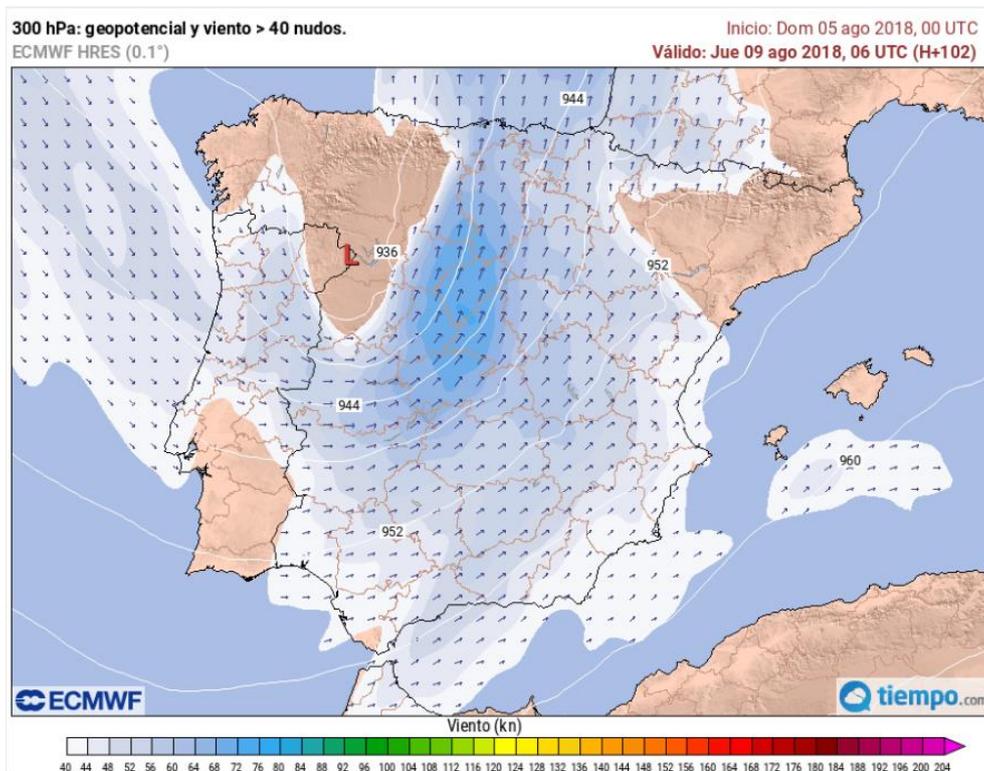


Ilustración 52. Pronóstico de 300 hPa del día 5 de agosto a las 00UTC, para las 06UTC del día 9 de agosto. Fuente: ECMWF y tiempo.com

¹³ Utilizamos modelos y productos que se elaboran directamente o a través de consorcios por agencias meteorológicas certificadas y avaladas por organismos internacionales.

Durante los días 7, 8 y 9, una vaguada en altura bastante pronunciada iba a atravesar la parte norte de la península, presentando la típica situación de vientos de componente SW que irían rolando al W y al NW durante su paso.

En la ilustración 52, se muestra la situación a 300 hPa (la altitud geopotencial en metros de la superficie de presión es la que marcan las isohipsas de color blanco), en un mapa del CEPMP para el día 9 de agosto a las 06 UTC (08 horas locales). Como se ve, existe una fuerte circulación de SSW que arrastraría nuestro globo hacia el norte:

La situación para los 500 hPa, según el GFS, si bien más atemperada, no difería en lo fundamental:

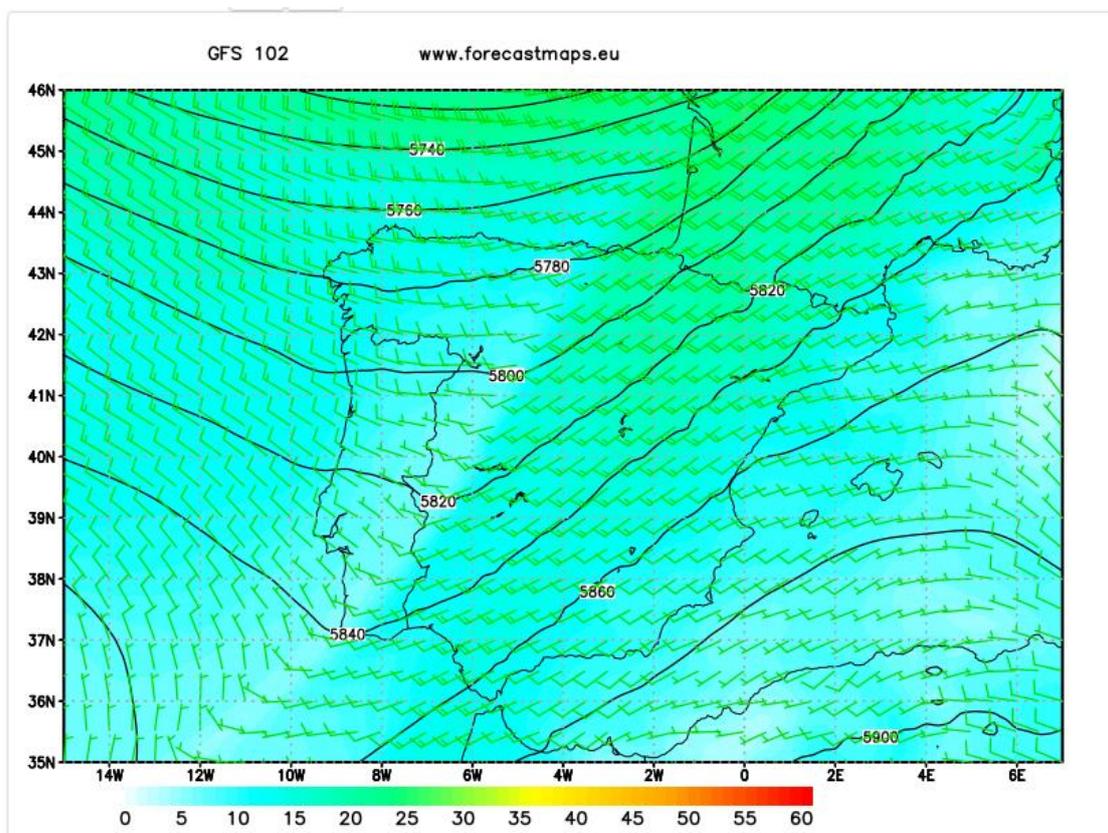


Ilustración 53. Situación a 500 hPa para las 06UTC del día 9 de agosto. Fuente: GFS de la NOAA

Hasta el paso eje de la vaguada por el punto de lanzamiento elegido, la circulación a niveles altos, presentaba vientos de componente sur superiores a 70 nudos, lo cual facilitaría que nuestros equipos llegaran a alcanzar la cordillera cantábrica o incluso la superaran. A medida que transcurriera el día 9, el desplazamiento del sistema hacia el Este y la circulación irían quedando en situación mucho más favorable. Los vientos a 300 hPa mayores de 40 nudos quedarían muy al este de nuestro punto de lanzamiento.



Ilustración 54. Situación en 300 hPa a las 06UTC del día 10 de agosto

Como se aprecia, a 500 hPa, las condiciones de circulación se iban definiendo a nuestro favor, tanto más cuanto mayor fuera el trascurso de la jornada. A las 06 UTC, quedaría como se ve en la imagen:

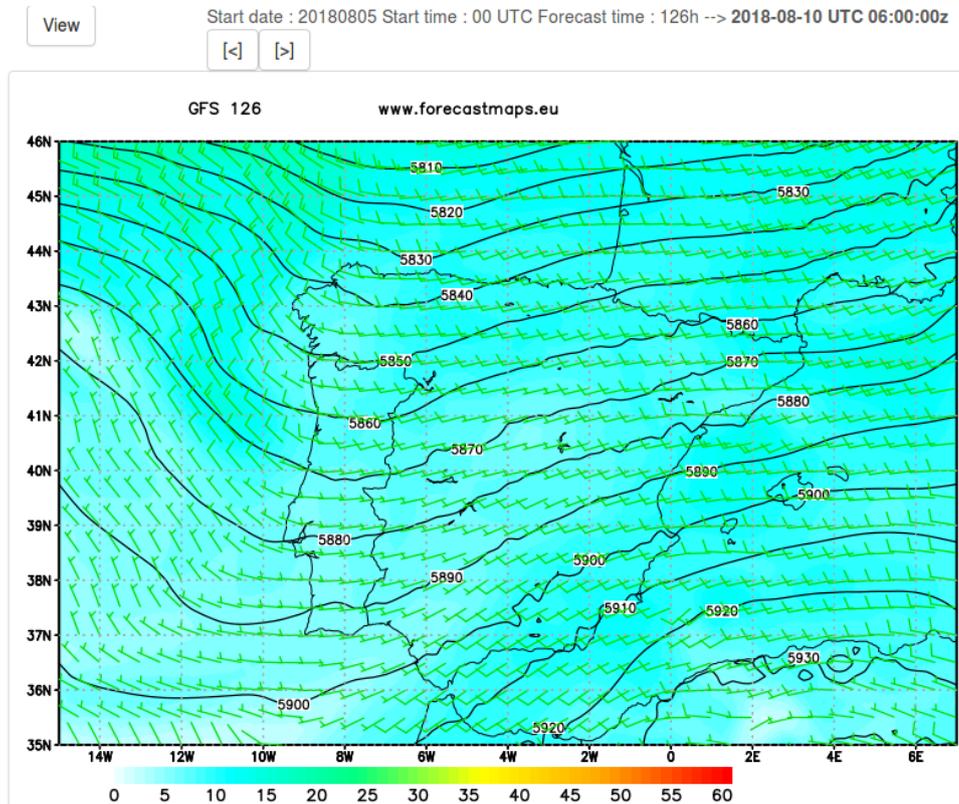


Ilustración 55. Pronóstico GFS a 500 hPa para las 06UTC del día 10. Fuente: NOAA



El escenario que proponen los modelos para la primera mitad del día 10 sobre Villada es de vientos sostenidos del oeste, con una intensidad floja a moderada.

Respecto al tiempo presente, cabía esperar alguna nubosidad, mucho menor que la prevista para el día 9. Quizá, a lo sumo, con 3 o 4 octavos de cielo cubierto de cúmulos o estratocúmulos. Nada preocupante como estratos muy bajos o nubes de gran desarrollo, que hubieran repercutido grandemente en la calidad de las imágenes que pretendíamos obtener. Deseábamos contar con cielos poco nubosos o despejados y el pronóstico general de Aemet, accesible desde su sitio web, nos mostraba un escenario acorde con nuestra preferencia.

Aunque en el apartado siguiente calcularemos la trayectoria con la mayor precisión para tratar de garantizar la recuperación, hicimos una aproximación al resultado del experimento haciendo uso del simulador de la Universidad de Cambridge para vuelos de aerostatos (Universidad de Cambridge, 2018). En la captura siguiente realizada el día 5 de agosto, se tiene una idea preliminar de un lanzamiento hipotético efectuado a las 07:30 UTC del día 10 de agosto. El simulador integra en sus cálculos la salida del modelo GFS para la hora propuesta. Como vemos, la trayectoria podría ajustarse a nuestro propósito porque no muestra un punto de aterrizaje ni inaccesible ni lejano.

Capital: Villada (altitud: 795 m)
Latitud: 42° 14' 56" N - Longitud: 4° 58' 4" O - Posición: Ver localización
Zona de avisos: Meseta de Palencia



Ilustración 56. Captura del pronóstico de Aemet para Villada del día 5 de agosto de 2018

Dado que estaba dentro de nuestra disponibilidad y de la horquilla temporal autorizada y que los pronósticos eran favorables, decidimos fijar el momento del lanzamiento para la



mañana del día 10 de agosto. Previsiblemente, dilatarlo más en el tiempo, no sólo hubiera implicado una modificación del permiso a la autoridad que gestiona el espacio aéreo, sino que presentaría un escenario de vientos fuertes de componente norte que volverían a plantear incertidumbres importantes sobre el lugar de aterrizaje y sobre la recuperación.

Además, podríamos contar con suficiente tiempo de luz solar para realizar el seguimiento en campo y la localización de los equipos.

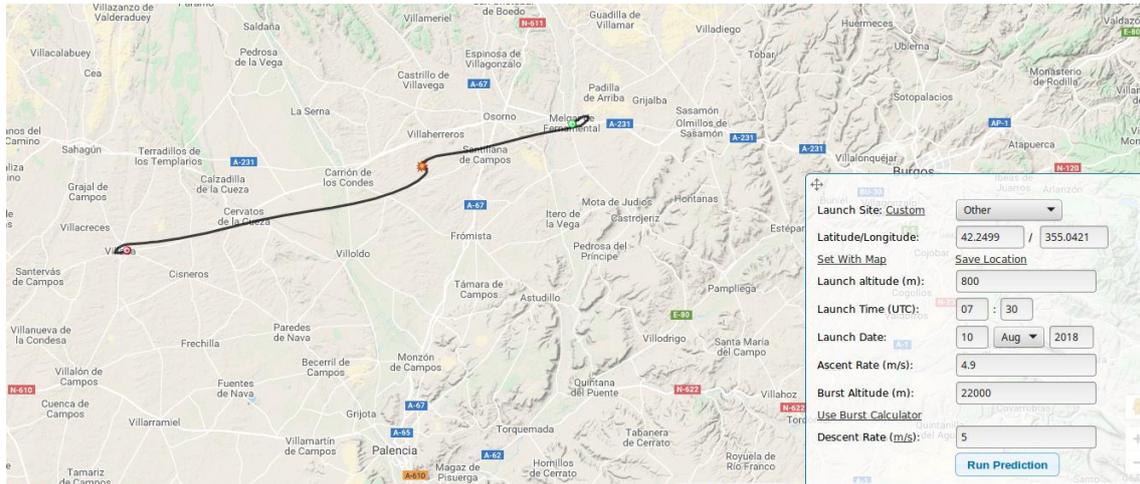


Ilustración 57. Captura de simulación de la trayectoria para el lanzamiento a las 07:30 UTC del día 10. Fuente: Universidad de Cambridge



ANEXO XII: Cálculo de la trayectoria probable

Una vez realizada la modelización del ascenso y descenso del globo y los equipos, podemos estimar una tasa de ascenso/descenso y un período de vuelo. Para calcular la probable trayectoria del mismo y su punto de aterrizaje, es necesario tener en cuenta otros factores.

En nuestro caso, partiremos de una hipótesis de trabajo: supondremos que desde pocos segundos después del lanzamiento, el conjunto globo/equipo se desplaza en el seno del fluido en el cual asciende, de igual forma que un corcho flotante lo hace, por ejemplo, sobre la superficie de un río o con las corrientes marinas.

En los radio-sondeos realizados para conocer el estado de la atmósfera por las agencias meteorológicas, se utiliza la señal GPS recogida por los equipos como referencia para determinar el viento en altura. De forma inversa, supondremos que el globo se desplaza horizontalmente en función de la componente horizontal del viento que vaya encontrando en su ascenso.

Para estimar estas condiciones recurrimos a las salidas previstas de los modelos numéricos de predicción para los distintos niveles de vuelo.

El modelo numérico de predicción que utilizaremos será el GFS (NOAA, 2018). No se trata de una decisión basada en la valoración de su eficacia, perfección o nivel de confianza. Existen otros modelos numéricos igualmente extendidos y cuya valoración no es objeto de este proyecto. Nuestra decisión se basa, fundamentalmente, en dos factores:

- Es un modelo suficientemente verificado y extendido cuya fiabilidad ofrece pocas dudas.
- Es un modelo con un acceso fácil y gratuito a sus productos derivados.

El modelo numérico elegido, además, es el utilizado por algunos de los simuladores (Universidad de Cambridge, 2018) que podemos utilizar como orientación para conocer la coherencia de nuestros resultados.

A partir de estas premisas, y procurando no complicar el manejo de las salidas de los modelos numéricos, lo que añadiría una complejidad notable a las labores del proyecto, vamos a definir una metodología que dividiremos en etapas:

1. Definiremos unos niveles de altitud por los que los equipos irán progresando desde el lanzamiento, que podemos hacer coincidir con los niveles de referencia de los que podemos obtener datos del modelo numérico.
2. A partir de los cálculos realizados en el [Anexo VI](#), determinaremos los tiempos de vuelo entre cada uno de los niveles.
3. Estimaremos una hora de lanzamiento para poder elegir la salida del modelo numérico adecuada.
4. Obtendremos los valores de viento horizontal que propone el modelo para cada uno de los niveles de vuelo a la hora prevista del lanzamiento.



5. Dado que supondremos que el conjunto globo/equipos navega en el seno de un fluido, que será el aire en el cual se ha lanzado, trataremos esa componente horizontal como el rumbo y velocidad a los que se desplaza.
6. Trazaremos una derrota del globo en sucesivos tramos entre niveles de altitud e iremos acumulando los incrementos de latitud y longitud que se produzcan hasta la llegada de los equipos a la superficie.

Niveles de referencia

Los niveles de referencia los definiremos en función de la presión. Podremos calcular los períodos de vuelo entre los mismos en función de los cálculos obtenidos en las etapas previas sobre la velocidad de ascenso.

Por un lado, en base a la atmósfera estándar y teniendo en cuenta la altitud del punto de lanzamiento, podemos estimar una presión inicial. Por otro lado, de los cálculos referidos a la altitud prevista ([Anexo III](#)) alcanzada por nuestro globo a partir del volumen inicial de inflado y el volumen máximo que soporta el globo antes de la explosión, podemos suponer una presión mínima alcanzada. Entre ambas, fijaremos esos niveles de referencia.

Los que definimos son los referidos para las presiones de superficie (921 hPa en nuestro caso a 795 metros) y de 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 150, 100, y 25 hPa para la atmósfera ISA (ISO, 2007).

Tabla 9. Niveles de referencia y altitudes en metros

<i>Presión en hPa</i>	<i>Altitudes en metros</i>
921	795
850	1467
700	3000
600	4200
500	5574
400	7182
300	9160
200	11770
150	13503
100	15790
25	22400

En la Tabla anterior, se indican las diferentes altitudes que tomaremos de referencia para cada uno de los niveles de presión.

La división en un número de niveles limitado nos posibilita entender con claridad el procedimiento que hemos elegido para nuestros cálculos. Lógicamente, una división en mayor número de niveles implicaría una mayor cantidad de información meteorológica a gestionar y un mayor número de cálculos, pero también un mayor grado de precisión en el resultado. El nivel de detalle elegido se adecúa con facilidad a nuestro acceso a la información y a nuestra capacidad de cálculo.



Tiempos de vuelo

En el siguiente anexo, se discutirá en detalle el resultado de la experiencia en relación a las estimaciones y cálculos de la velocidad de ascenso. En este apartado, no encontramos en el importante punto de determinar qué velocidad de ascenso estimar y, de esta manera, poder calcular un tiempo de vuelo para cada nivel.

La relevancia de este cálculo, radica en la necesidad de estimar correctamente la deriva en cada nivel de vuelo. Una subestimación de la velocidad se traduce en un período de vuelo mayor y, por lo tanto, en una sobreestimación de la deriva. Para las velocidades de ascenso, cuyo modelo se ha desarrollado en el [Anexo III](#), hemos obtenido una gráfica que vemos combinada con los datos registrados que mostramos en la ilustración 66.

En la tabla siguiente, se indican los tiempos de vuelo hasta un nivel determinado desde el anterior nivel de referencia, calculados según la velocidad de ascenso y descenso para cada uno de ellos. Es importante mencionar que hemos estimado una velocidad media de descenso. La modelización de la misma, como ya se ha dicho, es muy compleja y hemos recurrido a datos empíricos extraídos de los sondeos meteorológicos a los que se ha tenido acceso (Aemet, 2019). La elección de una velocidad determinada, se ha realizado a sabiendas de la posible diferencia con lo que se registre en la realidad (una mayor o menor velocidad media de descenso) pero, en cualquier caso, nos permitirá extraer conclusiones al respecto.

Tabla 10. Tiempos de vuelo estimados

<i>Niveles de Presión (hPa)</i>	<i>Altitudes (m)</i>	<i>Tasa de Ascenso (m/s)</i>	<i>Altura recorrida (m)</i>	<i>Tiempo (s)</i>
921	795	4,1	0	0
850	1467	4,2	672	163,902439
700	3000	4,3	1533	365
600	4200	4,4	1200	279,0697674
500	5574	4,5	1374	312,2727273
400	7182	4,7	1608	357,3333333
300	9160	4,9	1978	420,8510638
200	11770	5,1	2610	532,6530612
150	13503	5,3	1733	339,8039216
100	15790	6,1	2287	431,509434
25	22400	7,5	6610	1083,606557
100	15790	7,5	6610	881,3333333
150	13503	7,5	2287	304,9333333
200	11770	7,5	1733	231,0666667
300	9160	7,5	2610	348
400	7182	7,5	1978	263,7333333
500	5574	7,5	1608	214,4
600	4200	7,5	1374	183,2
700	3000	7,5	1200	160
850	1467	7,5	1533	204,4
921	795	7,5	672	89,6



Reflejamos totalizados en minutos los tiempos de vuelo para el ascenso y el descenso:

<i>Tiempo ascenso</i>	<i>71,43337175</i>
<i>Tiempo descenso</i>	<i>48,01111111</i>
<i>Tiempo total</i>	<i>119,4444829</i>

Estimación de la hora del lanzamiento

Dada la ubicación del punto de lanzamiento y la logística asociada al mismo, podemos estimar una hora antes de la cual será imposible comenzar el lanzamiento. Teniendo en cuenta desplazamientos desde Cantabria a la localidad de Villada en Palencia y la necesidad de contar con luz suficiente para operar en campo con tranquilidad, calculamos un momento de llegada al entorno de la Ermita de la Virgen del Río que rondaría las 09:30 hora local. Sería necesario entonces instalar los instrumentos e inventariarlos para comprobar su estado, colocación, etc... Después de dispuestos el personal y el instrumental necesario y supuesto ningún retraso sobre el horario previsto, no comenzaría el llenado del globo y la toma de medidas antes de las 10:30 horas locales.

El llenado del globo, realizado con la debida cautela, preveíamos que pudiera llevar una hora aproximadamente. Simultáneamente, parte del equipo se ocuparía de la conformación y colocación final de los instrumentos, así como de las comprobaciones de funcionamiento adecuado de los mismos. Estimábamos como probable el empleo de una hora y media en estos menesteres, dejando así margen suficiente para solucionar los imponderables que pudieran surgir sobre la marcha. Estos cálculos situaban la hora de lanzamiento no antes de las 12:00 hora local y, dado que el tiempo de vuelo que se había previsto era próximo a las dos horas, nos permitía poner el foco en la salida de los modelos numéricos de las 12 UTC.

Como veremos luego, en algunas circunstancias, las condiciones meteorológicas pueden sufrir cambios drásticos en algún aspecto. Ya hemos explicado que el contexto meteorológico para el día del lanzamiento era el del paso de una vaguada marcada que, precisamente sobre el mediodía del lanzamiento, localizaría su eje en la comarca que nos afectaba.

En el estudio que aquí incluimos, recurrimos al uso de la salida del modelo GFS para dos horas distintas. Las salidas del modelo consideradas fueron las siguientes:

- Pronóstico del día 4 de agosto de 2019 con pasada del modelo a las 06:00 UTC a 147 horas, validez para las 09:00 UTC del día 10 de agosto de 2019.
- Pronóstico del día 4 de agosto de 2019 con pasada del modelo a las 12:00 UTC a 144 horas, validez para las 12:00 UTC del día 10 de agosto de 2019.

La de las 09:00 UTC correspondería a las 11:00 horas locales y la de las 12:00 UTC a las 14:00 horas locales.

En la figura siguiente, se comparan las salidas de ambas horas para un nivel de presión determinado. Como se aprecia gráficamente, los flujos se han alterado notablemente en las 3 horas que comprenden los períodos de validez de ambos pronósticos.

Esta experiencia nos permitirá conocer, en base a los datos que manejamos, el peso del factor meteorológico a la hora de estimar el punto de aterrizaje y, por lo tanto, el de recogida de equipos y datos obtenidos.

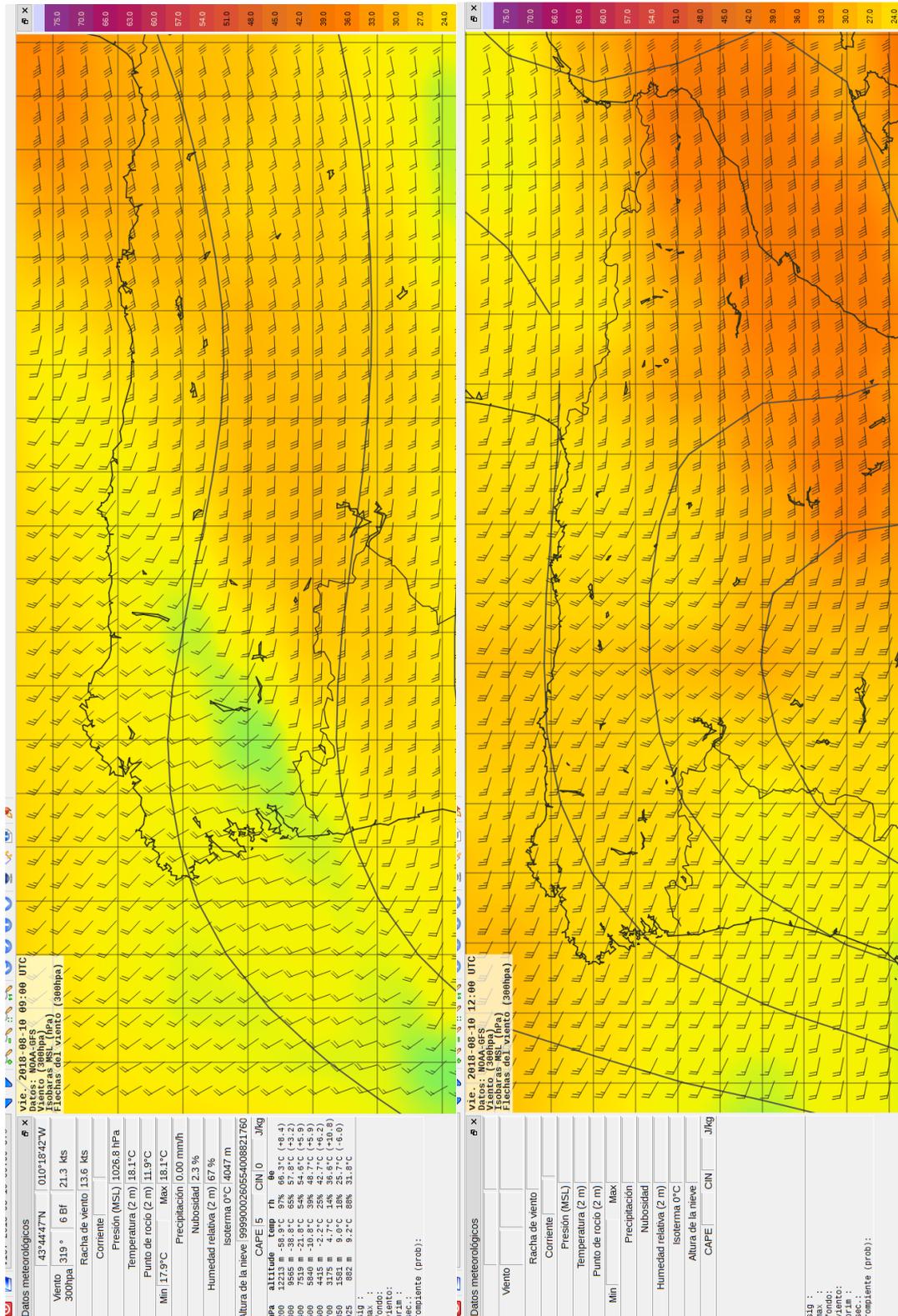


Ilustración 58. Comparación de salidas de modelo GFS de viento a 300 hPa para el 10 de agosto de 2019



Estima del desplazamiento horizontal del conjunto globo/equipos

Entre los diferentes niveles de referencia considerados, los equipos de desplazarán horizontalmente en función del rumbo y velocidad del viento horizontal que vayan encontrando, puesto que partimos del supuesto de que se mueven en el seno del fluido en el que se encuentran. Tomaremos, por tanto, el opuesto a la dirección del viento como el rumbo seguido por el globo y la fuerza del viento en nudos como su velocidad verdadera.

Para no iterar innecesariamente, realizaremos nuestro cálculo para el pronóstico de las 09:00 UTC. Tomaremos los valores de viento para cada nivel, los convertiremos en rumbos y calcularemos las distancias recorridas para cada intervalo en función de los tiempos de vuelo antes calculados. El resultado se expresa en la tabla siguiente.

Tabla 11. Rumbo del globo a diferentes niveles

<i>Nivel de presión (hPa)</i>	<i>Dirección del viento (grados)</i>	<i>Rumbo del Globo (grados)</i>	<i>Velocidad del viento (kt)</i>	<i>Tiempo de vuelo (horas)</i>	<i>Distancia recorrida (NM)</i>
921	55	235	18	0	0
850	64	244	10,4	0,04552846	0,8195122
700	245	65	9,2	0,10138889	1,05444444
600	273	93	14,3	0,07751938	0,71317829
500	269	89	21,9	0,08674242	1,24041667
400	260	80	26,7	0,0925926	2,17377778
300	272	92	29,1	0,11690307	3,12131206
200	256	76	28	0,14795918	4,30561224
150	256	76	28	0,09438998	2,64291939
100	256	76	28	0,11986373	3,35618449
25	256	76	28	0,30100182	8,428051
100	256	76	28	0,24481481	6,85481481
150	255	75	29	0,0847037	2,45640741
200	255	75	29	0,06418519	1,86137037
300	255	75	29	0,09666667	2,80333333
400	264	84	29,3	0,07325926	2,1464963
500	256	76	26,3	0,05955556	1,56631111
600	267	87	21,4	0,05088889	1,08902222
700	269	89	15,1	0,04444444	0,67111111
850	247	67	12,6	0,05677778	0,7154
921	71	251	9,8	0,02488889	0,24391111

Una vez establecidos los rumbos y distancias para cada período considerado, se tratará sólo de realizar un cálculo de navegación por estima. Dado que la experiencia está localizada en latitudes medias y que las distancias recorridas son pequeñas en términos geográficos, supondremos una navegación por loxodrómica, es decir, siguiendo una línea que une puntos con rumbos constantes. No se trata propiamente de un círculo máximo sino de un arco cuya proyección sobre una superficie tangente en el polo sería una espiral.



Como decimos, en distancias tan cortas para latitudes medias son prácticamente coincidentes.

En la ilustración posterior se muestra gráficamente la relación trigonométrica esférica de arcos y ángulos para una navegación por loxodrómica sobre la superficie.

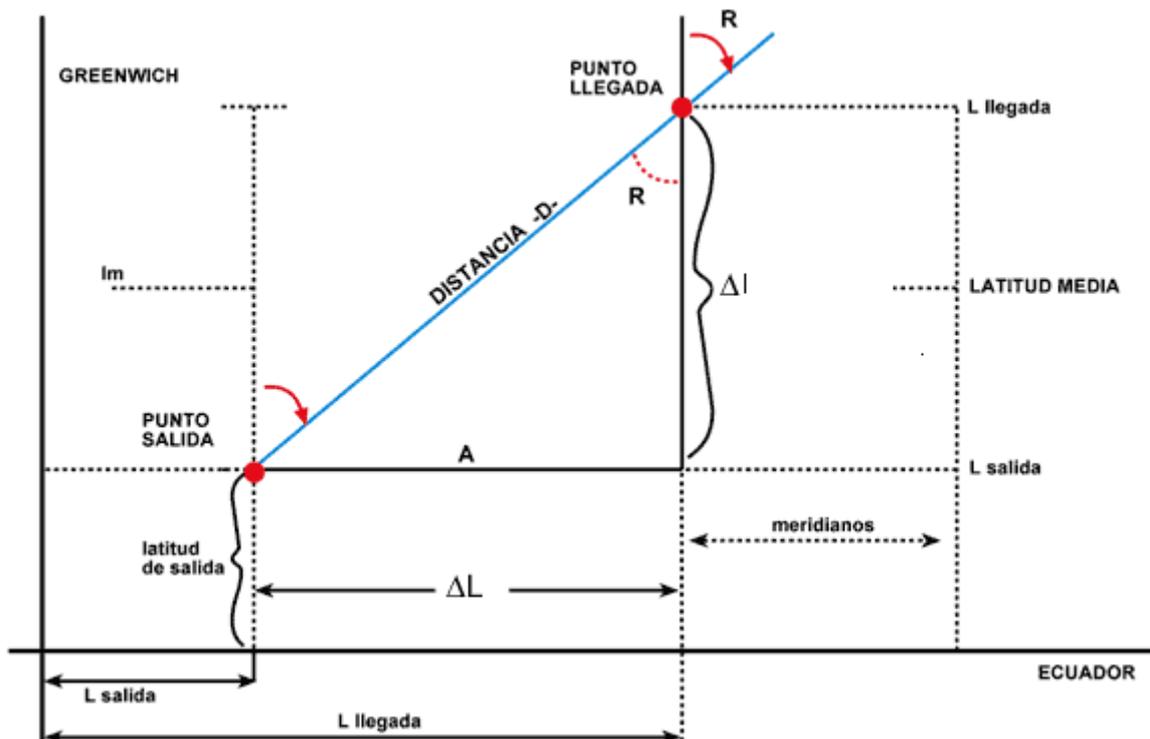


Ilustración 59. Incrementos de latitud y longitud en navegación loxodrómica

Para entender la relación trigonométrica entre lados y ángulos, hay que tener en cuenta que los lados de los triángulos considerados son arcos de círculos máximos sobre la superficie y que sus unidades de medida son todas en minutos. En el caso de los arcos serían minutos de meridiano, es decir, millas náuticas (NM) equivalentes a 1852 metros.

En la ilustración anterior:

l y L son latitud y Longitud respectivamente

lm es la latitud media entre los puntos de salida y llegada

R es el rumbo

A es el Apartamiento (arco de círculo no máximo paralelo al Ecuador entre las longitudes de salida y llegada)

D es la distancia recorrida en millas náuticas (NM)

En nuestro caso, aplicaremos lo que se denomina la estima directa, que se refiere a la necesidad de calcular las nuevas coordenadas a partir del conocimiento del rumbo y la



distancia navegadas. La estima inversa nos permitiría conocer el rumbo y distancia necesarios para alcanzar un punto determinado.

Las fórmulas trigonométricas que relacionan todas estas magnitudes son las siguientes.

Como se deduce fácilmente:

$$dl = D \times \cos R$$

$$A = D \times \sin R$$

Obteniéndose un incremento de latitud para cada intervalo que nos permitirá calcular la latitud media entre los puntos de salida y llegada y un apartamiento entre ambos puntos.

La relación entre radios y arcos para un mismo ángulo es constante y en el caso del Apartamiento y el incremento de Longitud, tal y como se ve en la figura adjunta, es función del coseno de la latitud media.

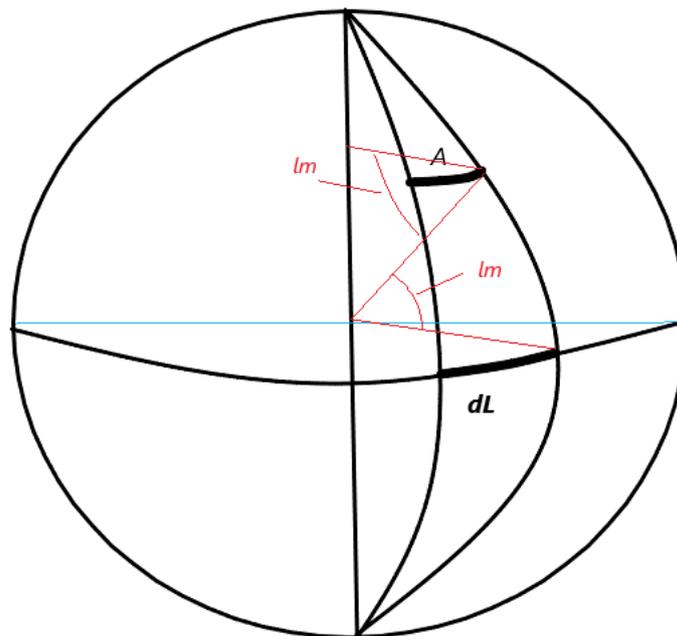


Ilustración 60. Relación entre Apartamiento e incremento de Longitud

Expresado en fórmula:

$$dL = A / \cos lm$$

El signo de cada incremento determina latitudes de destino más al norte (si son +) o longitudes más al oeste (si son +).

Aplicando sucesivamente estos cálculos para cada uno de los niveles de vuelo, proponemos una serie de puntos posicionales que describen la trayectoria estimada para



cada uno de los pronósticos, el válido para las 09:00 UTC y para las 12:00 UTC del día 10 de agosto de 2019.

En la tabla siguiente, se indican las distancias recorridas en minutos de meridiano, los rumbos en radianes, los apartamientos obtenidos para el pronóstico de las 09:00 UTC, así como los incrementos de latitud y de Longitud sucesivos, todos ellos también en minutos de meridiano.

Tabla 12. Apartamientos e incrementos de longitud y latitud para el pronóstico de las 09:00 UTC del día 10 de agosto de 2019

<i>Presión (hPa)</i>	<i>Distancia (NM)</i>	<i>Rumbo (radianes)</i>	<i>Incremento latitud (minutos)</i>	<i>Apartamiento (minutos)</i>	<i>Inc. Longitud (minutos)</i>
921	0	4,10153333	0	0	0
850	0,8195122	4,25861333	-0,30578436	-0,73657626	-0,99572096
700	1,05444444	1,13446667	0,44562494	0,95565239	1,29187319
600	0,71317829	1,62316	-0,03732757	0,71220077	0,9627696
500	1,24041667	1,55334667	0,02164375	1,24022782	1,67656889
400	2,17377778	1,39626667	0,37746556	2,14075444	2,89392176
300	3,12131206	1,60570667	-0,10894393	3,11941023	4,21689147
200	4,30561224	1,32645333	1,04160892	4,17772039	5,64753983
150	2,64291939	1,32645333	0,63937211	2,56441537	3,46663649
100	3,35618449	1,32645333	0,81192441	3,25649398	4,40220449
25	8,428051	1,32645333	2,03890471	8,17770819	11,0548166
100	6,85481481	1,32645333	1,65830916	6,65120266	8,99125083
150	2,45640741	1,309	0,63575776	2,3727093	3,20748375
200	1,86137037	1,309	0,4817526	1,79794719	2,43050693
300	2,80333333	1,309	0,72554777	2,70781429	3,66048649
400	2,1464963	1,46608	0,22436264	2,13473833	2,88578905
500	1,56631111	1,32645333	0,37892024	1,51978615	2,05448235
600	1,08902222	1,51844	0,05699116	1,08752996	1,47014835
700	0,67111111	1,55334667	0,01171007	0,67100894	0,90708553
850	0,7154	1,16937333	0,27952725	0,65852994	0,89021612
921	0,24391111	4,38078667	-0,07940733	-0,2306233	-0,31176195



Trazado de las trayectorias previstas

De los cálculos sucesivos que se han realizado a partir de ambos pronósticos se han obtenido los siguientes puntos de trayectoria. En azul se han resaltado los puntos de estallido previstos y en verde los puntos de aterrizaje.

Tabla 13. Puntos de trayectoria prevista para cada pronóstico

Deriva prevista del globo a las 09 UTC		Presión (hPa)	Deriva prevista del globo a las 12 UTC		Estallido real	
Latitud parcial (°, ', '')	Longitud parcial (°, ', '')		Latitud parcial (°, ', '')	Longitud parcial (°, ', '')	Latitud real (°, ', '')	Longitud real (°, ', '')
42° 15' 0"	4° 57' 18"	921	42° 15' 0"	4° 57' 18"	42° 14' 56"	4° 57' 43"
42° 14' 38"	4° 58' 18"	850	42° 15' 10"	4° 57' 16"	42° 14' 49"	4° 57' 43"
42° 15' 5"	4° 57' 0"	700	42° 16' 19"	4° 56' 5"	42° 15' 0"	4° 57' 32"
42° 15' 3"	4° 56' 2"	600	42° 16' 48"	4° 54' 32"	42° 15' 22"	4° 56' 31"
42° 15' 4"	4° 54' 22"	500	42° 17' 6"	4° 52' 15"	42° 15' 36"	4° 54' 50"
42° 15' 27"	4° 51' 28"	400	42° 17' 6"	4° 49' 27"	42° 15' 32"	4° 51' 47"
42° 15' 20"	4° 47' 15"	300	42° 15' 13"	4° 46' 24"	42° 15' 18"	4° 47' 42"
42° 16' 23"	4° 41' 36"	200	42° 13' 36"	4° 40' 24"	42° 15' 32"	4° 39' 22"
42° 17' 1"	4° 38' 8"	150	42° 13' 4"	4° 36' 22"	42° 16' 34"	4° 33' 50"
42° 17' 50"	4° 33' 44"	100	42° 12' 24"	4° 31' 16"	42° 17' 38"	4° 29' 6"
42° 19' 52"	4° 22' 41"	25	42° 11' 3"	4° 20' 50"	42° 20' 6"	4° 25' 8"
42° 21' 32"	4° 13' 41"	100	42° 9' 41"	4° 10' 24"	42° 21' 15"	4° 23' 23"
42° 22' 10"	4° 10' 29"	150	42° 9' 13"	4° 6' 48"	42° 21' 31"	4° 21' 40"
42° 22' 39"	4° 8' 3"	200	42° 8' 41"	4° 4' 49"	42° 21' 56"	4° 17' 0"
42° 23' 22"	4° 4' 24"	300	42° 7' 23"	4° 2' 43"	42° 22' 2"	4° 14' 56"
42° 23' 36"	4° 1' 30"	400	42° 7' 23"	4° 0' 42"	42° 22' 1"	4° 13' 26"
42° 23' 59"	3° 59' 27"	500	42° 7' 33"	3° 59' 25"	42° 22' 9"	4° 11' 34"
42° 24' 2"	3° 57' 59"	600	42° 7' 51"	3° 58' 30"	42° 22' 14"	4° 10' 36"
42° 24' 3"	3° 57' 5"	700	42° 8' 2"	3° 58' 20"	42° 22' 31"	4° 9' 55"
42° 24' 19"	3° 56' 11"	850	42° 8' 15"	3° 58' 17"	42° 22' 52"	4° 9' 5"
42° 24' 15"	3° 56' 30"	921	42° 8' 15"	3° 58' 17"	42° 22' 45"	4° 9' 15"
42° 24' 15"N	3° 56' 30"		42° 8' 15"N	3° 58' 17"	42° 22' 45"N	4° 9' 15"

Por último, adjuntamos un trazado de las trayectorias sobre mapa para la estima según cada uno de los pronósticos y según lo recogido por los sensores de posicionamiento durante la experiencia real.

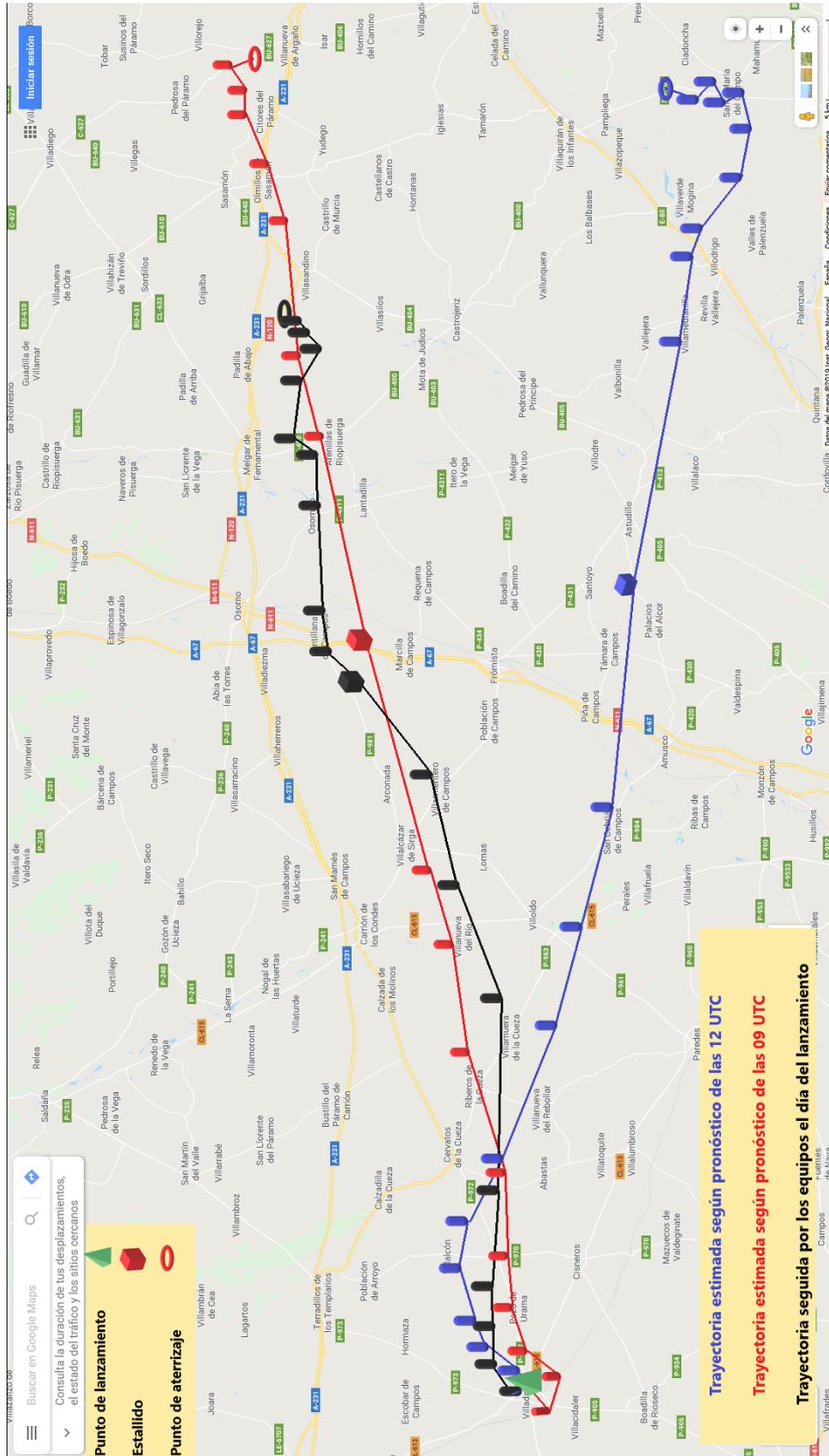


Ilustración 61. Trayectoria real y trayectorias estimadas para las 09 y las 12 UTC del módulo Yuri



ANEXO XIII: Datos recogidos y análisis de los mismos

Los datos obtenidos mediante los sensores de presión y temperatura externa quedan reflejados en la siguiente tabla. Se le han añadido las dos columnas correspondientes a la longitud y latitud del globo, valores que eran registrados por los localizadores GPS del habitáculo.

<i>t/s</i>	<i>P/Pa</i>	<i>T/K</i>	<i>Latitud/°</i>	<i>Longitud/°</i>	<i>t/s</i>	<i>P/Pa</i>	<i>T/K</i>	<i>Latitud/°</i>	<i>Longitud/°</i>
0	93100	297			2250.43	25700	243	42.258	-4.738
30.795	90900	296			2287.366	25100	241		
55.423	88700	294			2327.384	24500	238		
80.043	86600	292			2370.468	23900	237	42.257	-4.719
116.982	84600	290			2425.861	23100	238		
141.604	83700	290	42.249	-4.962	2468.949	22300	236		
163.152	82600	290			2502.816	21600	235		
200.107	80800	289			2521.263	21300	235	42.26	-4.69
243.165	78900	288			2579.748	20400	233		
286.242	77000	286	42.247	-4.962	2616.654	19700	232		
326.251	75300	286			2656.684	19100	232		
369.331	73500	286			2669.01	19000	232	42.259	-4.656
415.489	71700	285			2705.939	18600	234		
433.945	70900	285	42.25	-4.959	2755.214	18000	233		
458.58	69900	284			2758.289	17900	233		
498.597	68300	284			2804.478	17400	233		
541.686	66700	283			2819.875	17200	233	42.263	-4.627
587.854	65000	282	42.253	-4.95	2853.761	16800	233		
634.018	63300	281			2896.849	16400	232		
680.175	61700	280			2939.947	15900	233		
738.633	59600	279	42.256	-4.942	2967.64	15700	232	42.268	-4.593
775.58	58400	278			3010.748	15200	233		
812.509	57200	277			3047.694	14900	233		
877.167	55100	275	42.259	-4.93	3103.066	14300	233		
938.71	53200	274			3115.382	14200	233	42.276	-4.564
987.967	51700	272			3152.323	13900	233		
1027.985	50500	271	42.26	-4.914	3186.169	13500	232		
1067.974	49300	270			3229.268	13100	232		
1117.242	47900	269			3281.614	12600	232		
1160.346	46700	269			3324.708	12300	233		
1175.727	46400	269	42.26	-4.899	3364.702	11800	233		
1215.719	45400	268			3401.649	11500	233		
1258.792	44300	267			3444.748	11100	233		
1329.574	42800	266	42.259	-4.881	3481.693	10800	234		
1372.658	41900	266			3527.86	10500	234		
1424.97	40900	265			3564.795	10300	235	42.294	-4.485
1471.146	40000	264	42.259	-4.863	3614.054	9900	236		
1529.617	38700	261			3657.155	9600	238		
1588.089	37600	259			3697.186	9300	239		
1621.95	36800	258	42.257	-4.844	3712.57	9200	240	42.302	-4.465
1683.474	35700	257			3755.675	9000	241		
1735.813	34700	256			3798.791	8700	242		
1775.841	33900	255	42.254	-4.82	3869.602	8300	243	42.308	-4.448
1828.19	32800	252			3900.366	8100	243		
1874.366	31700	250			3946.549	7900	245		
1923.623	30900	250	42.255	-4.795	3980.411	7700	245		
1982.664	29900	249			4014.262	7500	245	42.316	-4.437
2028.827	29300	249			4072.709	7200	245		
2078.085	28500	247	42.256	-4.768	4115.799	7000	246		
2127.338	27600	243			4168.14	6800	247	42.324	-4.424
2176.554	26800	244			4229.698	6500	246		
2225.817	26100	244			4269.713	6300	247		



t/s	P/Pa	T/K	Latitud/ $^{\circ}$	Longitud/ $^{\circ}$	t/s	P/Pa	T/K	Latitud/ $^{\circ}$	Longitud/ $^{\circ}$
4312.809	6200	247	42.33	-4.42	6412.917	68900	279	42.375	-4.165
4355.915	5900	248			6492.997	72700	282		
4405.151	5800	249			6551.527	75200	283	42.377	-4.157
4442.089	5600	249			6619.262	78500	284		
4463.618	5500	249	42.335	-4.419	6693.171	82200	286		
4503.642	5400	249			6711.652	83100	286	42.381	-4.151
4543.665	5300	250			6767.093	86300	287		
4546.741	5400	250			6819.438	88600	289		
4577.543	5900	247			6856.345	90200	291	42.379	-4.154
4592.928	6100	246			6865.586	90800	291		
4620.641	6600	245			6902.539	93000	293		
4645.276	7000	243							
4666.829	7400	242							
4694.557	7900	241							
4722.247	8400	240							
4750.498	9000	239							
4781.314	9600	239							
4812.086	10200	237							
4839.813	10800	236							
4870.616	11400	235							
4901.389	12200	234							
4932.195	12900	234	42.354	-4.39					
4978.344	14000	233							
5018.354	14900	232							
5058.356	16000	232							
5076.835	16500	232	42.359	-4.361					
5119.932	17600	232							
5159.963	18700	231							
5199.964	19900	230							
5243.076	21200	228							
5280.005	22400	229							
5320.027	23700	230							
5369.277	25400	232							
5412.389	26900	233							
5461.625	28600	236	42.366	-4.283					
5507.808	30200	238							
5550.914	31700	241							
5603.245	33500	243							
5652.516	35300	246	42.367	-4.249					
5714.117	37500	249							
5772.613	39800	252							
5821.867	41700	255	42.367	-4.224					
5886.556	44300	257							
5945.013	46800	261							
5954.239	47200	261	42.368	-4.209					
6003.512	49200	263							
6058.912	51600	266							
6102.005	53500	268	42.369	-4.193					
6178.976	56900	271							
6249.761	60200	273	42.371	-4.177					
6311.341	63400	276							
6369.835	66600	277							

Tabla 14. Datos de P , T y posición del globo

Precisión del sensor de presión: 1hPa

Precisión del sensor de temperatura: 1°C

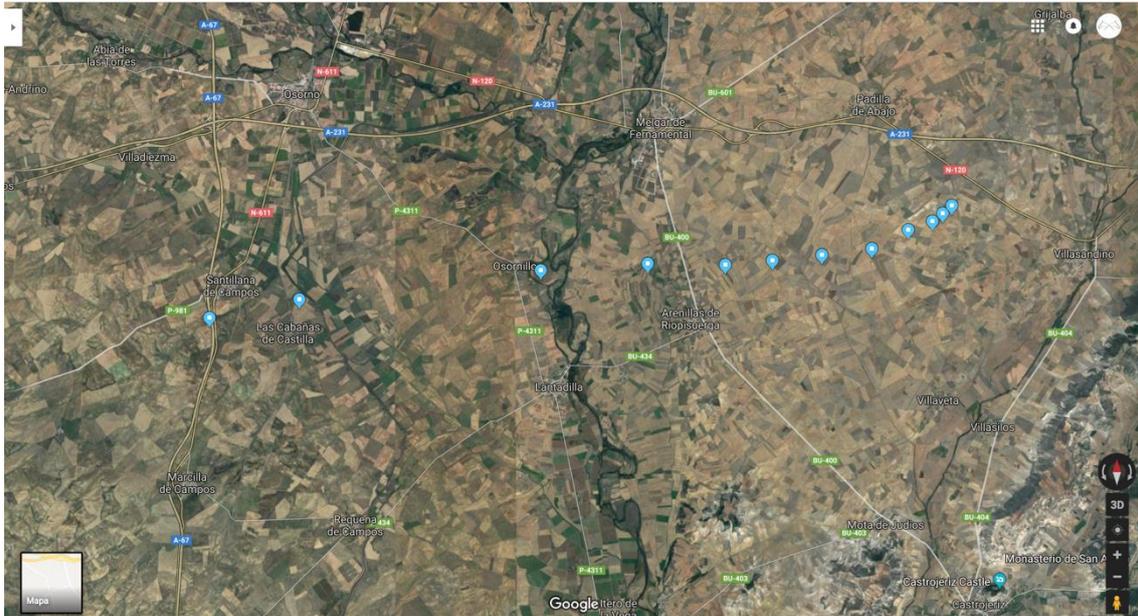


Ilustración 63. Vista en 2D del descenso del globo.

También resulta de utilidad disponer de una animación en 3D con giro continuo del ángulo de visión. De nuevo, Google Maps permite esta opción. El resultado de estos movimientos se recoge en un vídeo al que se accede desde el siguiente enlace:

https://drive.google.com/file/d/1VL1k7o2Lml8R_HEI9U1aQNScFChvAISf/view?usp=sharing

Por último, dentro de este apartado de datos, se muestra una gráfica de la evolución de la presión registrada a lo largo del tiempo.

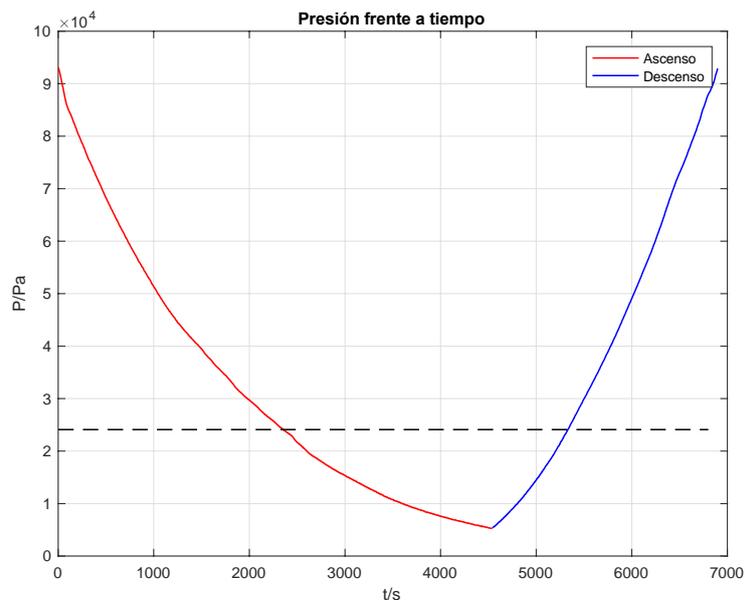


Ilustración 64. Evolución de la presión durante el tiempo de vuelo



La forma resulta muy característica y concordante con todas las que se encuentran en estudios similares al aquí presentado. Se ha marcado una línea discontinua que corresponde a 241 hPa que, como se verá en el siguiente apartado, corresponde aproximadamente con el inicio de la tropopausa. Allí se hace algún comentario sobre la forma de esta curva.

Análisis de los datos

Una vez que los equipos han recogido a través de los sensores los datos de Presión y Temperatura, la primera variable que se puede determinar es la altitud.

Sin necesidad de representar los datos de temperatura resulta inmediato constatar que el funcionamiento del sensor ha sido defectuoso. En la Tabla 15 se puede ver cómo la temperatura no desciende nunca por debajo de los 228K (-46°C) e incluso en su punto más alto (punto de menor presión) la temperatura llega hasta los 250K (-23°C). En cualquier sondeo de Santander o Madrid se puede ver cómo a partir de los 11000m (comienzo de la tropopausa) el valor de T se estabiliza en torno a los 217K (-56°C) lo que es coincidente con lo que se recoge en cualquier manual de meteorología para una latitud como la de este lanzamiento. Por tanto, una de las dos variables principales para la determinación de la altitud queda invalidada.

Las razones del incorrecto funcionamiento pueden resumirse en dos; por un lado, la sonda tenía mucha inercia térmica y su tiempo de respuesta era excesivamente lento. En pruebas posteriores a este trabajo se pudo comprobar cómo el tiempo que necesitaba para ofrecer temperaturas correctas en un congelador doméstico (-18°C) eran cercanas a los 30 min si partía de una temperatura ambiente de 20°C. Esto se ajusta muy bien a lo que muestra la Ilustración 64, donde el descenso por debajo de la tropopausa (11000m) es muy concordante con la previsión teórica. La razón más lógica es la de pensar que en el descenso la sonda ya viene enfriada de las capas superiores con lo cual su tiempo de respuesta ahora es menor. No obstante, hay que destacar que a partir de los 15000 m la temperatura no solo no se mantiene constante, sino que aumenta hasta los 250K. Esta segunda causa habría que buscarla en el hecho de que la sonda no estaba protegida de la radiación solar directa y en algunos casos, a pesar del movimiento constante del globo, se podía producir una exposición lo suficientemente prolongada como para aumentar su temperatura por encima de la del aire circundante.

Lo correcto sería poder establecer la altitud en base a cualquiera de las dos fórmulas barométricas 4bis o 6bis del [Anexo V](#), para la zona isoterma o la zona lineal respectivamente. Al disponer de datos cada 3 segundos las caídas de temperatura son tan insignificantes que se llega a resultados casi idénticos utilizando cualquiera de ellas de forma única para las dos zonas. Obviamente lo que se hace es ir sumando todos los incrementos de altura calculados (con 4bis o 6bis del [Anexo V](#)) entre dos medidas consecutivas de los sensores para tener el total acumulado respecto al suelo.

Dado que los datos de temperatura no son correctos solo hay dos posibilidades. La primera consiste en importar los datos de temperatura de los sondeos de Santander o Madrid en ese día y hora y copiar los registros que obtienen para cada valor de la presión. En ese caso quedaría desprovisto de interés el sondeo del globo de Villada ya que si para determinar la altura nos basta con los datos de presión y temperatura y estos últimos son



los que se registraron en otros lugares para unos valores de presión dados, sería tanto como estar clonando el sondeo de Madrid o Santander. Como mucho interpolándolo. Así que, dado que este trabajo se desarrolla en el ámbito de la docencia en Educación Secundaria, se decide derivar todos los datos de altitud a partir de las condiciones de partida en el punto de lanzamiento a través de las fórmulas 4bis o 6bis del [Anexo V](#).

De ese modo, se conseguirá también un objetivo no menos interesante como es comprobar la bondad de estas fórmulas en amplios rangos de altitud sin necesidad de realimentar las ecuaciones con datos intermedios. Esta comprobación se realizará analizando los datos del GPS de los sondeos de Madrid o Santander y comparando con los valores de altitud que resultan de utilizar las fórmulas barométricas empleando solo las condiciones iniciales o realimentando con toda la serie de datos intermedios.

Antes de presentar la tabla correspondiente a la altitud del globo, hay que destacar que la utilización de la fórmula (6bis del [Anexo V](#)) para atmósfera con caída lineal de T se restringió hasta los 241 hPa, lo que conduce hasta una altura próxima a los 11000m. En cuanto a la expresión de la altitud para atmósfera isoterma (4bis del [Anexo V](#)) se estableció (dado que la sonda de temperatura medía de modo incorrecto) como temperatura constante la que suelen ofrecer los manuales para estas latitudes, unos 56°C (217K). En cuanto a los datos iniciales se pueden ver en la primera fila de la tabla 15, $P_0=931\text{hPa}$; $T_0=297\text{K}$. La altitud del punto de lanzamiento h_0 era de 795m.

En lo que a constantes se refiere, se han tomado para los cálculos de la tabla los siguientes valores:

Constante de los gases ideales $R=8,314\text{ J/K.mol}$

Masa molar del aire seco $M=0,02897\text{ kg/mol}$

De igual modo que ocurrió con la tabla anterior, presentamos a continuación una versión compacta por no extender en exceso los datos. El conjunto completo de valores se puede consultar en este enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1VM8Sr5wX7Cb89L1zpm1AHQ9zDBkvTwp2/view?usp=sharing>

Como puede verse en la siguiente tabla el globo habría alcanzado una altura máxima de 20789m lo cual, como se mostrará enseguida, es muy concordante con los datos de los sondeos de Madrid y Santander. Si se hubiese determinado la altitud a través de las fórmulas barométricas realimentando con los datos intermedios de temperatura de esta sonda exterior (a priori el método más exacto) y sumando todos los incrementos, se llegaría a una altitud máxima de 21966m, significativamente diferente a la obtenida por el método directo (en lo sucesivo se llamará método directo al que resulta de derivar las altitudes en base a las fórmulas barométricas manteniendo en todos los cálculos $P_0=931\text{hPa}$ y $T_0=297\text{K}$ en lo que se refiere al tramo lineal y $P_0=241\text{hPa}$ y $T=217\text{K}$ en la zona isoterma).



Tabla 15. Tiempo, presión y altitud derivados de las fórmulas barométricas a partir de los datos del lanzamiento

t/s	P/Pa	h/m	t/s	P/Pa	h/m
0	93100	795	2250.43	25700	10724.197
30.795	90900	1002.52	2287.366	25100	10884.649
55.423	88700	1214.147	2327.384	24500	11048.237
80.043	86600	1420.156	2370.468	23900	11217.956
116.982	84600	1620.151	2425.861	23100	11434.307
141.604	83700	1711.4	2468.949	22300	11658.285
163.152	82600	1824.012	2502.816	21600	11860.958
200.107	80800	2010.933	2521.263	21300	11949.836
243.165	78900	2211.932	2579.748	20400	12224.182
286.242	77000	2416.889	2616.654	19700	12446.065
326.251	75300	2603.772	2656.684	19100	12642.618
369.331	73500	2805.41	2669.01	19000	12675.976
415.489	71700	3011.086	2705.939	18600	12811.187
433.945	70900	3103.842	2755.214	18000	13019.557
458.58	69900	3220.986	2758.289	17900	13054.959
498.597	68300	3411.271	2804.478	17400	13234.991
541.686	66700	3605.199	2819.875	17200	13308.457
587.854	65000	3815.42	2853.761	16800	13457.986
634.018	63300	4030.14	2896.849	16400	13611.119
680.175	61700	4236.538	2939.947	15900	13807.874
738.633	59600	4514.116	2967.64	15700	13888.315
775.58	58400	4676.306	3010.748	15200	14093.986
812.509	57200	4841.218	3047.694	14900	14220.662
877.167	55100	5136.677	3103.066	14300	14481.851
938.71	53200	5411.961	3115.382	14200	14526.446
987.967	51700	5634.971	3152.323	13900	14662.139
1027.985	50500	5817.183	3186.169	13500	14847.691
1067.974	49300	6002.934	3229.268	13100	15038.824
1117.242	47900	6224.329	3281.614	12600	15286.12
1160.346	46700	6418.306	3324.708	12300	15439.252
1175.727	46400	6467.43	3364.702	11800	15702.971
1215.719	45400	6633.056	3401.649	11500	15866.62
1258.792	44300	6818.692	3444.748	11100	16091.589
1329.574	42800	7077.942	3481.693	10800	16265.701
1372.658	41900	7237.044	3527.86	10500	16444.719
1424.97	40900	7417.103	3564.795	10300	16566.928
1471.146	40000	7582.229	3614.054	9900	16818.633
1529.617	38700	7826.138	3657.155	9600	17014.177
1588.089	37600	8037.76	3697.186	9300	17215.931
1621.95	36800	8194.838	3712.57	9200	17284.631
1683.474	35700	8415.398	3755.675	9000	17424.3
1735.813	34700	8620.735	3798.791	8700	17639.735
1775.841	33900	8788.482	3869.602	8300	17938.835
1828.19	32800	9024.449	3900.366	8100	18093.835
1874.366	31700	9266.912	3946.549	7900	18252.711
1923.623	30900	9447.564	3980.411	7700	18415.661
1982.664	29900	9678.783	4014.262	7500	18582.9
2028.827	29300	9820.536	4072.709	7200	18842.311
2078.085	28500	10013.243	4115.799	7000	19021.329
2127.338	27600	10235.346	4168.14	6800	19205.536
2176.554	26800	10437.75	4229.698	6500	19492.263
2225.817	26100	10618.906	4269.713	6300	19690.863



t/s	P/Pa	h/m
4312.809	6200	19792.541
4355.915	5900	20107.715
4405.151	5800	20216.345
4442.089	5600	20439.339
4463.618	5500	20553.842
4503.642	5400	20670.445
4543.665	5300	20789.228
4546.741	5400	20670.445
4577.543	5900	20107.715
4592.928	6100	19895.872
4620.641	6600	19395.243
4645.276	7000	19021.329
4666.829	7400	18668.199
4694.557	7900	18252.711
4722.247	8400	17862.73
4750.498	9000	17424.3
4781.314	9600	17014.177
4812.086	10200	16628.926
4839.813	10800	16265.701
4870.616	11400	15850.96
4901.389	12200	15452.884
4932.195	12900	15121.548
4978.344	14000	14629.164
5018.354	14900	14249.096
5058.356	16000	13809.033
5076.835	16500	13617.063
5119.932	17600	13210.769
5159.963	18700	12824.54
5199.964	19900	12423.641
5243.076	21200	12010.845
5280.005	22400	11647.613
5320.027	23700	11271.478
5369.277	25400	10804.039
5412.389	26900	10412.184
5461.625	28600	9988.917
5507.808	30200	9608.768
5550.914	31700	9266.912
5603.245	33500	8873.561
5652.516	35300	8496.967
5714.117	37500	8057.246
5772.613	39800	7619.332
5821.867	41700	7272.775
5886.556	44300	6818.692
5945.013	46800	6401.988
5954.239	47200	6336.997
6003.512	49200	6018.578
6058.912	51600	5650.024
6102.005	53500	5367.972
6178.976	56900	4882.883
6249.761	60200	4434.011
6311.341	63400	4017.381
6369.835	66600	3617.444

t/s	P/Pa	h/m
6412.917	68900	3339.495
6492.997	72700	2896.312
6551.527	75200	2614.871
6619.262	78500	2254.746
6693.171	82200	1865.263
6711.652	83100	1772.675
6767.093	86300	1449.916
6819.438	88600	1223.867
6856.345	90200	1069.401
6865.586	90800	1012.049
6902.539	93000	804.477



Estos cálculos realizados mediante la aplicación Matlab se omiten en esta memoria por no engrosar innecesariamente su volumen.

Se pueden utilizar los datos del sondeo de Madrid y Santander para ver el grado de similitud en los resultados y la bondad de los distintos métodos. El procedimiento es el que sigue: Se determina la altitud hasta los 53hPa por el método directo, por el método de intervalos (realimentando las fórmulas barométricas con todos los datos intermedios) y mediante los valores proporcionados por el chip GPS. Todo partiendo de los 931hPa hasta los 241hPa para cambiar de fórmula barométrica y llegar hasta los 53hPa finales. En cada caso la T_0 es la que se registró con 931hPa en cada localidad. Este es el resultado:

Tabla 16. Comparativa de diferentes métodos de medida de altitud

	SONDEO MADRID	SONDEO SANTANDER	SONDEO VILLADA
Método incrementos/m	$800+10251+9590=20641$	$52+10925+9654=20631$	
Método directo/m	$800+10349+9624=20773$	$52+10888+9624=20564$	$795+10370+9624=20789$
GPS/m	20647	20652	

Ciertamente, el método de calcular las altitudes sumando incrementos suficientemente pequeños debería de ser el más preciso. Además, elimina el tener que usar dos fórmulas barométricas, según la zona, dado que en tramos tan pequeños la temperatura es prácticamente constante y se ha podido demostrar que es indiferente hacer el cálculo con una u otra. Pero la atmósfera real se ve afectada por otras variables como humedad, viscosidad etc. que hacen que la modelización de las fórmulas barométricas deba ser, en alguna medida, corregida con otros términos. En ningún caso es el objetivo de este trabajo, que busca construir un modelo de atmósfera sencillo pero eficaz que pueda ser comprendido, desarrollado y utilizado por alumnos de Secundaria. Si se admiten como exactos los datos del GPS el método directo proporciona errores por debajo del 0,6% lo cual puede ser considerado como más que aceptable. Además, como se sabe, el error del GPS en coordenadas de altitud puede dar errores de hasta decenas de metros. Y por supuesto, entra dentro de lo admisible que los parámetros de presión o temperatura en Villada tengan desviaciones respecto a Santander o Madrid (menores del 1%).

Por último, hay que destacar que después de estudiar en detalle el sondeo de Madrid se podía ver cómo hasta los 8000m el método directo proporcionaba más aproximación al GPS que el método de incrementos lo cual deja a las claras que no es intrínsecamente mejor ya que penaliza al realimentar con datos de las zonas con “irregularidades” o desviaciones del comportamiento ideal. Sea como fuere, la buena concordancia del método directo con los datos reales resalta lo acertado de modelizar la atmósfera en estas capas en base a las fórmulas barométricas. Para el alumno resulta muy potente ver la capacidad predictora de estas ecuaciones que con el solo conocimiento de las condiciones en el punto de lanzamiento permiten determinar la presión/altitud en cualquier punto del ascenso del globo. Sin duda, uno de los valores de este trabajo.

Una vez establecidas las alturas de la Tabla 15 como “alturas del sondeo de Villada” se puede realizar la gráfica altitud-temperatura para ilustrar las explicaciones ofrecidas anteriormente sobre la inercia y tiempo de respuesta de la sonda de temperatura exterior.

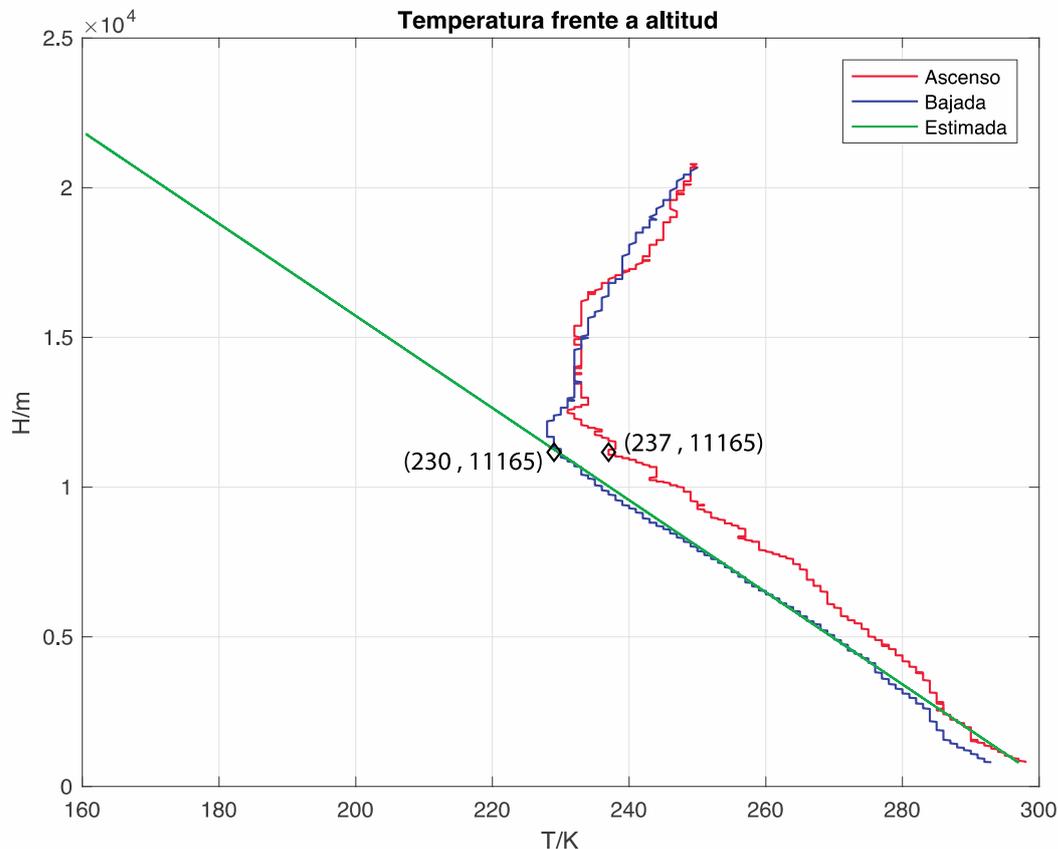


Ilustración 65. Comparación de la evolución de la temperatura en el ascenso y el descenso frente a los valores teóricos.

Para representar la recta de valores estimados se ha utilizado lógicamente la caída lineal de temperatura que establece la fórmula 5 del [Anexo V](#) con un coeficiente $L=0,0065\text{K/m}$.

Otra consecuencia lógica del carácter isoterma de los primeros kilómetros de la estratosfera es que para conseguir una diferencia de presión determinada se necesita un incremento de altitud superior al que se necesitaría con una atmósfera lineal. Esto se traduce en que la pendiente experimenta un cambio más drástico y apreciable por debajo de los 241hPa (línea discontinua de la Ilustración 64) volviéndose mucho más horizontal. Es cierto que el eje de abscisas representa el tiempo y no la altitud, pero dado que el globo asciende un poco más rápido en la estratosfera el cambio de inclinación debería ser en realidad más notorio al estirar ligeramente la escala horizontal en esa zona.

La gráfica de presiones frente a altitudes refleja esta situación de modo perfecto ya que al haber obtenido las alturas a partir de las fórmulas barométricas el ajuste a las dos curvas es total.

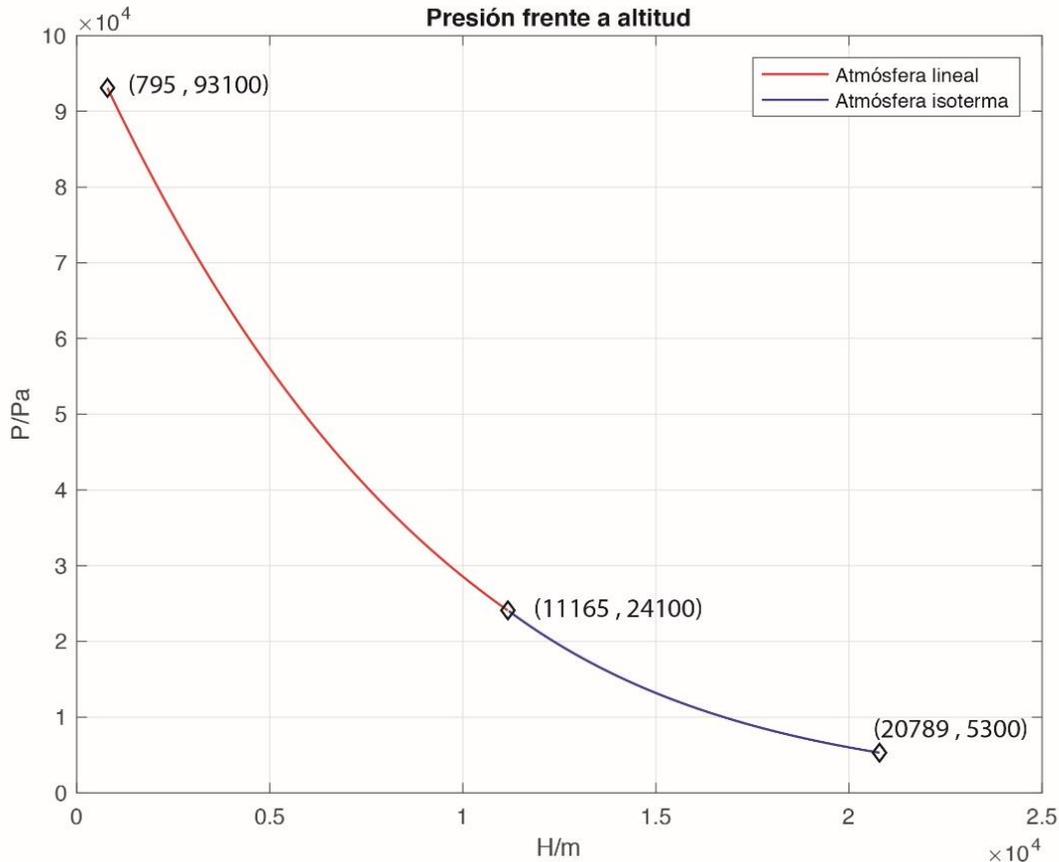


Ilustración 66. Presión frente a altitud con las dos curvas teóricas, lineal e isoterma

Otra cuestión que se ha pretendido analizar en este trabajo es la velocidad de ascenso de un globo en un medio como la atmósfera. Para ello se han tomado valores de la altitud de la tabla 15 extendida. Cada 5 registros, lo que corresponde a unos 15 s o 60m de ascenso, se determina de modo casi automático la velocidad calculando la relación entre el incremento de altitud y el incremento de tiempo. Ello se refleja en la tabla 17.



Tabla 17. Velocidad con respecto a la altitud.

$v/m \text{ s}^{-1}$	h/m	$v/m \text{ s}^{-1}$	h/m
5.482	879.409	6.205	14990.499
8.292	1390.48	3.241	15235.885
3.957	1701.223	6.768	15543.43
5.42	2010.933	7.125	15866.62
4.185	2286.973	3.736	16149.098
4.302	2592.685	7.788	16444.719
4.428	2873.511	4.069	16691.534
4.548	3150.538	4.227	16948.325
3.899	3447.35	4.465	17284.631
4.821	3740.721	4.662	17567.109
4.952	4017.381	4.891	17862.73
4.246	4288.814	5.129	18172.777
4.374	4581.371	5.396	18498.73
4.491	4855.086	5.693	18842.311
4.622	5136.677	6.02	19205.536
4.762	5411.961	6.407	19590.787
4.901	5695.324	6.822	20000.91
4.038	5971.723	7.297	20439.339
5.19	6256.383	7.718	20789.228
4.269	6500.322		
4.396	6767.697		
3.374	6990.719		
3.458	7219.23		
3.541	7435.304		
3.629	7656.586		
3.734	7921.718		
5.112	8175.053		
2.63	8395.122		
4.041	8641.531		
4.164	8894.959		
4.309	9200.118		
4.421	9447.564		
3.037	9678.783		
3.111	9892.296		
4.806	10160.669		
3.31	10412.184		
3.395	10645.105		
5.259	10911.692		
3.614	11159.107		
3.528	11379.525		
7.41	11715.535		
3.894	12009.786		
6.154	12350.022		
4.303	12642.618		
4.463	12879.887		
4.668	13162.365		
4.856	13420.272		
5.065	13689.091		
5.257	13928.92		
2.742	14178.156		
5.699	14437.567		
5.938	14708.021		



La tabla extendida puede consultarse en este enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1e-QyvDkWMCKXTWL8nlpSkufDogGJQLmz/view?usp=sharing>

En principio las ecuaciones que lo gobiernan no son difíciles de plantear y resulta, en algunos aspectos, hasta elemental. La situación dinámica del ascenso del globo queda definida por la ecuación 1 del [Anexo III](#) entendiendo que la velocidad terminal se alcanza prácticamente de inmediato. Una vez más, diferenciando la zona lineal de la isoterma para el tratamiento formal se llega a dos ecuaciones como la 7 y 10 del [Anexo III](#) respectivamente.

Resulta de interés comparar los datos reales del sondeo con los que se deducen de estas fórmulas. Para una mejor comprensión se representan en una misma gráfica los valores medidos y los estimados.

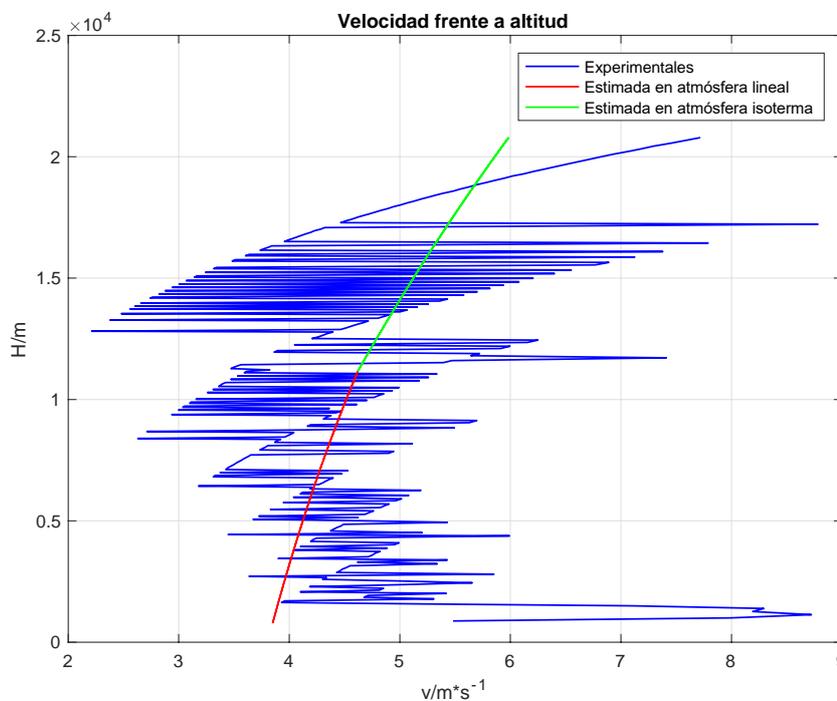


Ilustración 67. Velocidad de ascenso frente a la altitud.

De igual modo se puede realizar la gráfica de bajada con los valores medidos. En este caso no hay valores estimados ya que *modelizar* la caída del globo después de su explosión resultaría de una complejidad extrema por el gran número de variables implicadas. Como puede verse, la hoja de cálculo devuelve valores negativos para la bajada dado que al seguir el mismo algoritmo que en la subida las posiciones finales son menores que las iniciales. Por tanto, el incremento de altura resulta negativo y también la velocidad asociada.

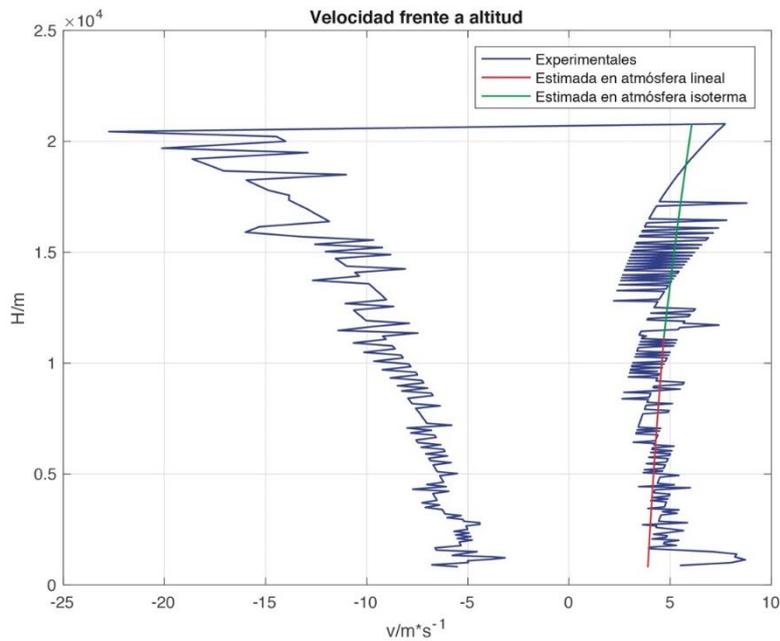


Ilustración 68. Velocidades de subida y bajada referidas a la altitud

Varias cuestiones deben ser matizadas antes de continuar ofreciendo datos o gráficas:

La primera, hace referencia a los datos reales involucrados en las fórmulas de la velocidad en el momento del lanzamiento. Todos ellos, peso W , radio del globo r_0 , densidad del aire ρ , coeficiente aerodinámico C , constante de los gases ideales R , masa molar del aire M o temperatura del lanzamiento T se encuentran recogidos en el apartado de cálculos previos y explicados en el correspondiente a la ejecución del lanzamiento.

De igual modo a lo que ocurre con la altitud derivada de la presión, resulta interesante ver la evolución de las ecuaciones de la velocidad desde la base y con solo los datos del punto de lanzamiento. De hecho, realimentar las fórmulas de velocidad con las temperaturas, y por tanto densidad de cada punto, hace que sea menos clara la comparación entre datos reales y datos previstos. Puede resultar más interesante presentar una única gráfica sobre la cual contrastar los datos del sondeo y tener una imagen más definida de la evolución de esa curva frente a valores reales.

Un dato de especial trascendencia es la elección del coeficiente aerodinámico C . A pesar de que existen numerosos estudios al respecto no deja de ser un parámetro empírico que se obtiene en distintas pruebas de laboratorio. Pero fundamentalmente tiene una relación directa con el número de Reynolds. En el [Anexo IV](#) se le dedica una breve reflexión. Para una esfera es habitual encontrar en muchas fuentes un valor de 0,5. Un análisis más detenido arroja valores de 0,47 para las condiciones de velocidad, viscosidad etc. en las que se va a mover mayormente el globo. No obstante, también es un objetivo de este trabajo encontrar un coeficiente aerodinámico efectivo que consiga la mayor concordancia entre datos reales y valores estimados. En el apartado de simuladores ya se indicó que, por defecto, era habitual ver asignado un valor de 0,25 lo cual conduce a resultados con un importante grado de desviación respecto a la realidad. En el presente trabajo se han obtenido excelentes resultados mantenido un valor de 0,47.



Sobre la forma de las gráficas de velocidad (figura 68) cabe decir que suelen presentar ese aspecto dentado por los saltos en los valores de la presión, que hacen que si un valor de la velocidad ha quedado especialmente elevado el siguiente resulte muy por debajo del valor real. El efecto es especialmente exagerado en las zonas de más altitud, donde un salto de 1hPa supone una variación de decenas de metros. En este caso se sumó el problema de que, por un error, se utilizó una librería de software para leer los datos del sensor que trabajaba con tipos de dato enteros, lo que hacía que descartase los decimales. De ese modo los saltos en la presión eran de un 1hPa por lo que la sonda puede estar mostrando un número entero en un punto, pero en realidad estar solamente a una décima de cambiar de dígito. Así, puede haber dos medidas consecutivas con variación en el valor de presión y otras que necesitan más de tres o cuatro para reflejar algún cambio. Tanto es así que en los puntos superiores del recorrido el dato recogido era el mismo en los cinco registros que se tomaban como intervalo de alturas. Esto conduce a un valor nulo de la velocidad y una aparente detención del globo. Los ceros de velocidad (en torno a 10 valores) fueron retirados de la tabla, lo cual falsea ligeramente la evolución de la velocidad. En mayor o menor medida este problema lo presentan todas las sondas que no tengan elevada precisión.

Otra idealización necesaria para este estudio es suponer que el gas del globo toma la temperatura del entorno de modo inmediato y que su dilatación no es en ningún modo adiabática. Hay estudios (Modelling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion, 2011) que recogen la posibilidad de que, en cierta medida, se produzca un enfriamiento adiabático del globo pero además de ser poco significativo dificulta en exceso la modelización. Además, la capacidad del gas ascensional de tomar la temperatura del entorno dependerá fuertemente de la tasa de ascenso del globo (Notes on Meteorological Balloon Mission Planning, 2013). Para valores tan reducidos de la velocidad es razonable suponer que el comportamiento adiabático no es en absoluto significativo.

Más complicado aún sería admitir un calentamiento/enfriamiento radial del globo. En ese caso habría que recurrir a plantear las ecuaciones de difusión del calor y añadir el consiguiente término para corregir los cálculos. Las ecuaciones diferenciales que se necesitarían para este propósito exceden con mucho el nivel que se puede asumir en estos niveles de Educación Secundaria.

Se puede comparar esta última gráfica con las que se encuentran en estudios similares (Modelling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion, 2011) (Notes on Meteorological Balloon Mission Planning, 2013) En los primeros 5000m los valores reales son superiores a los determinados por la gráfica para estabilizarse después en un grado de coincidencia razonable. Es muy posible que estas zonas con cambio de velocidad tan marcado estén asociadas a cambios en el coeficiente aerodinámico como se explica en el [Anexo IV](#). En cualquier caso, se incide en la necesidad de disponer de un sensor de presión con mayor precisión para evitar los saltos drásticos en altitud, y por tanto en velocidad, que hacen tan marcado el diente de sierra.

Viendo la fórmula 1 del [Anexo IV](#), es fácil comprender que el número de Reynolds del globo que asciende en la atmósfera será decreciente ya que la densidad es el factor con



mayor variabilidad de todos los que aparecen en ella y, por tanto, el que marque su evolución. Se trata pues de determinar a qué alturas del presente sondeo se pueden estar alcanzando esos valores críticos de Re .

Sin detallar los cálculos, por otra parte elementales, se determina que en el punto de lanzamiento Re podía tener un valor en torno a $3,7 \cdot 10^5$ mientras que a los 6000m sería de $3,2 \cdot 10^5$ para situarse por debajo de $2,7 \cdot 10^5$ a unos 11000m de altura.

Si se observa la gráfica de la Ilustración 66 o la tabla 17 con los datos de velocidad vertical se percibe como la tendencia de la velocidad es de crecimiento desde el momento del lanzamiento hasta aproximadamente los 6800m. A partir de ahí hay una caída manifiesta de las velocidades que no se recupera hasta casi los 9000m, desde donde retoma un lento crecimiento. De igual manera si se determinan velocidades medias por tramos de 1000m se llega a conclusiones similares.

Todo ello es concordante con lo expresado en otro párrafo ya que a 6000m se estimaba que el número de Reynolds se situaba en $3,2 \cdot 10^5$. Es más que razonable suponer que en torno a esa altitud se haya producido la crisis de arrastre, incrementándose la resistencia aerodinámica. A partir de ahí y durante un amplio rango de altitudes (y por tanto de Re) el coeficiente aerodinámico permanecerá bastante estable produciéndose así una evolución de la velocidad que dependerá solo de las variaciones de presión y temperatura.

Por todo lo expuesto anteriormente se refuerza la idea y la necesidad de establecer coeficientes aerodinámicos efectivos para cada caso particular. A pesar de que existen estudios que pretenden generalizar gráficas provistas de datos concretos (similares a la figura 44) cada situación requiere de un estudio detallado de sus condiciones. Por citar un factor a tener en cuenta, se sabe que la rugosidad y material de cada globo incide en el valor del coeficiente aerodinámico, como no puede ser de otra manera. La capa límite y los puntos de separación de ésta respecto al objeto quedan muy condicionados a las características de las superficies. El ejemplo y estudio de las pelotas de golf resulta paradigmático.

En el estudio del presente sondeo se asumió un valor de 0,47 para el coeficiente aerodinámico, dato que se puede encontrar en diversos artículos. Esto no es arbitrario en absoluto a la vista de que C toma valores de 0,1 cuando Re es muy grande y permanece levemente por encima de 0,5 cuando Re se sitúa por debajo de 10^5 . Este será un valor a determinar empíricamente en cualquier experiencia similar a la que aquí se describe.

En cuanto a las velocidades de bajada se ve cómo empiezan con valores próximos a los 80km/h para descender por debajo de los 10m/s al llegar a los 10000m de altitud. Momentos antes de llegar a tierra se estabiliza en torno a los 6m/s. Todo ello es perfectamente explicable por una razón. Por encima de 20000m la densidad del aire es tan baja que el rozamiento aerodinámico es insignificante y por tanto muy elevada la velocidad terminal. Esto incide también en que el funcionamiento del paracaídas resulta deficiente hasta que no llega a altitudes próximas a tierra.

Derivada de la ecuación de la velocidad se obtiene, sin demasiada complicación, la ecuación del tiempo de ascenso. Diferenciadas para zona lineal e isoterma se llega a las expresiones 1 y 2 del [Anexo VI](#) respectivamente. Por tanto, nos ofrecerá una gráfica tan

acertada o incorrecta como haya resultado la de la figura 67. El resultado se puede ver en la figura 68.

Como consecuencia de aquellas velocidades experimentales superiores a las teóricas (hasta los 6000m aproximadamente) se puede apreciar cómo la curva del tiempo de ascenso despega del tiempo estimado precisamente en esa zona. Es más que probable que las zonas de cambio de tendencia obedezcan a cambios en los valores del coeficiente aerodinámico. Sin embargo, este es el parámetro de más difícil modelización. Las demás magnitudes, como se viene mostrando hasta ahora, tienen un grado de concordancia muy elevado con lo previsto por las fórmulas. Con todo, la asunción de un coeficiente medio de 0,47 ofrece un resultado más que aceptable a la vista de esta última gráfica.

En cuanto al descenso, la rama de la derecha también resulta elocuente habida cuenta de que la pendiente de la gráfica vuelve a ser la propia velocidad vertical. La marcada inclinación con la que comienza a caer es reflejo de las velocidades elevadas que se mostraron en la figura 68 y vuelve a ser significativo cómo se suaviza la pendiente al llegar a los 5000m. Con toda seguridad corresponderá con la zona de trabajo de máxima eficacia del paracaídas que se ha utilizado.

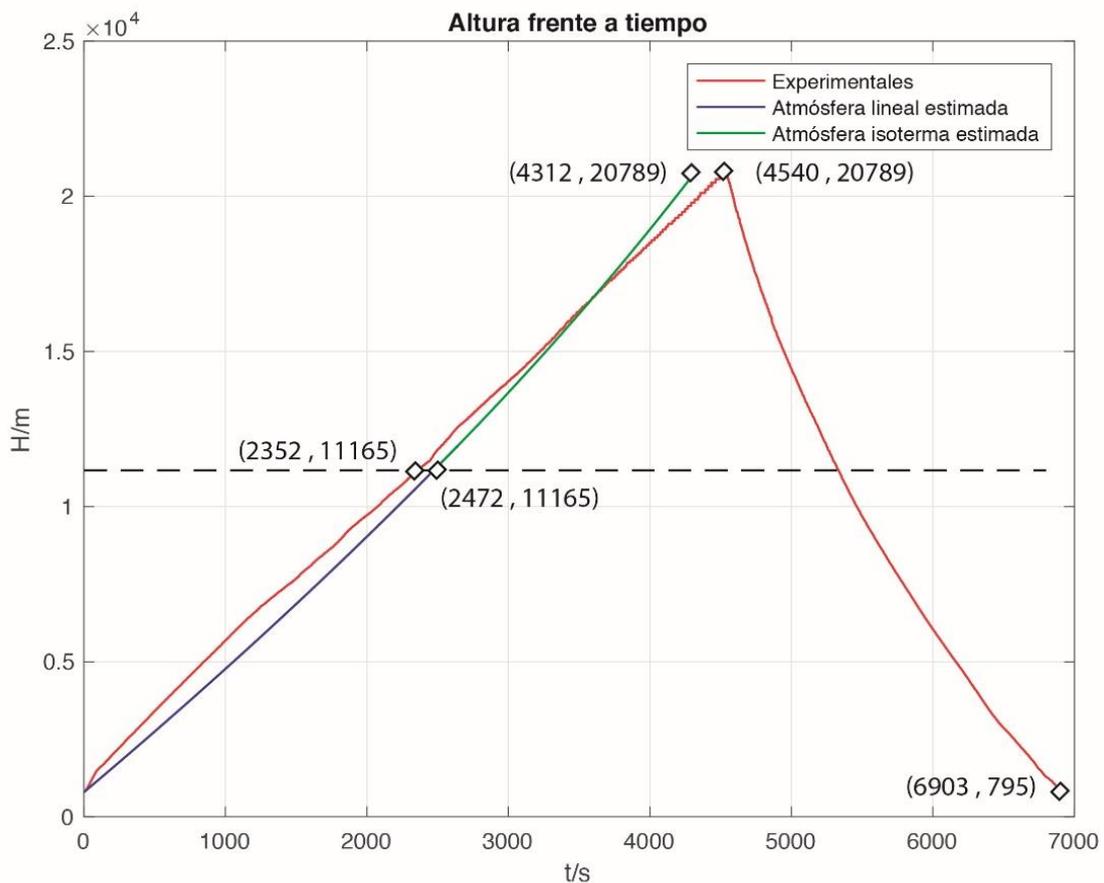


Ilustración 69. Tiempo de ascenso/altitud

Para esta última gráfica se han utilizado los tiempos proporcionados por el chip de la placa Arduino. Es lo que se ha denominado, tiempo de sondeo. La razón es que aquí los



tiempos ya vienen asignados a presiones y, por tanto, a altitudes concretas. En la tabla 5, cuando se hablaba de grabación de imágenes, se veían unas ligeras discrepancias con los tiempos dependiendo de cómo fueran tomados. Ya se dijo entonces que el más indiscutible es el de las cámaras de vídeo por ir asociados a imágenes. No obstante, la discrepancia de 4s se debe a que la placa Arduino proporcionaba información cada 3s aproximadamente. Por eso puede haber un error absoluto de 3s tanto en la hora del despegue como del aterrizaje. En cuanto a la hora de llegada al suelo del GPS que aparece en la citada tabla, no es más que el primer dato que se tuvo con una localización inmóvil, prueba definitiva de que el globo estaba en tierra. Los localizadores enviaban, si todo iba bien, información cada 2,5 min lo cual no quiere decir que esa sea la hora exacta en la que toca tierra. Por otra parte, la última localización que envió en vuelo data de las 13:31:47. Si se acepta que el aterrizaje se produjo a las 13:32:34 esto supone que el último dato antes del aterrizaje se envía 47s antes de tocar suelo. Un resultado casi idéntico se desprende del análisis de los valores de la tabla 15 con datos del sondeo. En la siguiente imagen pueden verse estos tiempos tal y como lo recogía la aplicación de móvil del Spot Gen. Esto quiere decir que si en ese momento el globo lleva una velocidad horizontal de algo más de 2 m/s la pérdida de señal al tocar suelo habría supuesto una deriva de algo más de 100m. Esta cuestión dependiendo de la orografía del terreno podría complicar mucho la recuperación. Todo ello refuerza la idea de utilizar dos receptores GPS para garantizar tener señal en el punto de aterrizaje.

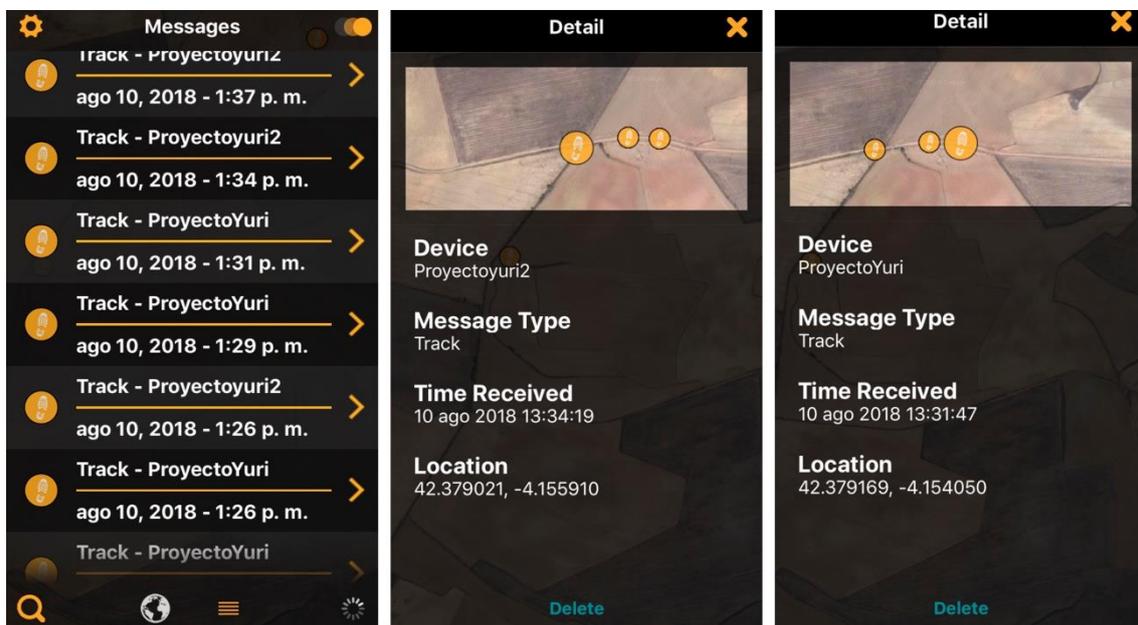


Ilustración 70. Datos de posicionamiento del Spot-gen

Por último, se pueden utilizar los datos de latitud y longitud para realizar una estimación de las velocidades horizontales del globo y de su dirección. Se puede obtener de una manera un poco más laboriosa introduciendo directamente los datos sobre Google Maps pero existen aplicaciones web que proporcionado las coordenadas de latitud y longitud



de dos puntos calculan la distancia en línea recta entre dichos puntos y la dirección de ese vector. Dado que, en este trabajo, los datos de posición vienen asociados a una referencia horaria se puede determinar de inmediato la velocidad media del globo en ese intervalo. Esto es tanto como decir que se tiene la velocidad y dirección del viento dado que el globo acaba moviéndose en muy pocos segundos según la velocidad de este. Tal es el caso de la siguiente aplicación:

<https://www.sunearthtools.com/es/tools/distance.php>

Con todo, se obtiene una tabla de velocidades y direcciones del globo (viento) según la altitud (tabla 18).

Todo esto servirá para analizar la bondad de las predicciones de los vientos en altitud para ese día. En función de dichas predicciones se realizó una estimación de la posible caída del globo que se estudia en profundidad en un anexo. De igual modo, en el apartado de simuladores se analizó alguno que realizaba predicciones sobre el punto de caída. Todos ellos realizan un proceso similar al descrito en el citado anexo.



Tabla 18. Velocidad horizontal y dirección según la altitud.

P/Pa	h/m	$v_x/\text{m s}^{-1}$	Dirección viento/ $^{\circ}$	P/Pa	h/m	$v_x/\text{m s}^{-1}$	Dirección viento/ $^{\circ}$
93100	795			25700	10724.197	14.38	84.8°N
90900	1002.52			25100	10884.649		
88700	1214.147			24500	11048.237		
86600	1420.156			23900	11217.956	13.1	94°N
84600	1620.151			23100	11434.307		
83700	1711.4			22300	11658.285		
82600	1824.012			21600	11860.958		
80800	2010.933			21300	11949.836	15.94	82°N
78900	2211.932			20400	12224.182		
77000	2416.889	1.53	180°N	19700	12446.065		
75300	2603.772			19100	12642.618		
73500	2805.41			19000	12675.976	18.95	92.3°N
71700	3011.086			18600	12811.187		
70900	3103.842	2.32	36.5°N	18000	13019.557		
69900	3220.986			17900	13054.959		
68300	3411.271			17400	13234.991		
66700	3605.199			17200	13308.457	16	79.4°N
65000	3815.42	5.27	65.7°N	16800	13457.986		
63300	4030.14			16400	13611.119		
61700	4236.538			15900	13807.874		
59600	4514.116	4.86	63.13°N	15700	13888.315	19.3	78.7°N
58400	4676.306			15200	14093.986		
57200	4841.218			14900	14220.662		
55100	5136.677	7.55	71.34°N	14300	14481.851		
53200	5411.961			14200	14526.446	17.32	69.5°N
51700	5634.971			13900	14662.139		
50500	5817.183	8.86	85.1°N	13500	14847.691		
49300	6002.934			13100	15038.824		
47900	6224.329			12600	15286.12		
46700	6418.306			12300	15439.252		
46400	6467.43	8.34	90°N	11800	15702.971		
45400	6633.056			11500	15866.62		
44300	6818.692			11100	16091.589		
42800	7077.942	9.67	94.3°N	10800	16265.701		
41900	7237.044			10500	16444.719		
40900	7417.103			10300	16566.928	15.16	72.9°N
40000	7582.229	10.46	90°N	9900	16818.633		
38700	7826.138			9600	17014.177		
37600	8037.76			9300	17215.931		
36800	8194.838	10.46	98°N	9200	17284.631	12.77	61.6°N
35700	8415.398			9000	17424.3		
34700	8620.735			8700	17639.735		
33900	8788.482	13.05	99.6°N	8300	17938.835	9.8	64.5°N
32800	9024.449			8100	18093.835		
31700	9266.912			7900	18252.711		
30900	9447.564	13.98	86.9°N	7700	18415.661		
29900	9678.783			7500	18582.9	8.81	45.5°N
29300	9820.536			7200	18842.311		
28500	10013.243	14.35	87.1°N	7000	19021.329		
27600	10235.346			6800	19205.536	9.03	50.2°N
26800	10437.75			6500	19492.263		
26100	10618.906			6300	19690.863		



P/Pa	h/m	$v_x/m\ s^{-1}$	<i>Dirección viento/°</i>	P/Pa	h/m	$v_x/m\ s^{-1}$	<i>Dirección viento/°</i>
6200	19792.541	5.12	26.2°N	68900	3339.495	6.61	62.3°N
5900	20107.715			72700	2896.312		
5800	20216.345			75200	2614.871	4.9	70.5°N
5600	20439.339			78500	2254.746		
5500	20553.842	3.71	8.4°N	82200	1865.263		
5400	20670.445			83100	1772.675	4.125	50.1°N
5300	20789.228			86300	1449.916		
5400	20670.445			88600	1223.867		
5900	20107.715			90200	1069.401	2.14	228.5°N
6100	19895.872			90800	1012.049		
6600	19395.243			93000	804.477		
7000	19021.329						
7400	18668.199						
7900	18252.711						
8400	17862.73						
9000	17424.3						
9600	17014.177						
10200	16628.926						
10800	16265.701						
11400	15850.96						
12200	15452.884						
12900	15121.548	6.82	48.5°N				
14000	14629.164						
14900	14249.096						
16000	13809.033						
16500	13617.063	16.58	78.1°N				
17600	13210.769						
18700	12824.54						
19900	12423.641						
21200	12010.845						
22400	11647.613						
23700	11271.478						
25400	10804.039						
26900	10412.184						
28600	9988.917	16.8	83°N				
30200	9608.768						
31700	9266.912						
33500	8873.561						
35300	8496.967	14.92	86.4°N				
37500	8057.246						
39800	7619.332						
41700	7272.775	12.13	90.9°N				
44300	6818.692						
46800	6401.988						
47200	6336.997	9.47	84.8°N				
49200	6018.578						
51600	5650.024						
53500	5367.972	8.85	83.6°N				
56900	4882.883						
60200	4434.011	9.02	82.72°N				
63400	4017.381						
66600	3617.444						



Para finalizar este apartado se analiza el posible radio/volumen del globo en el momento del estallido. Dado que los valores de presión y temperatura en el momento de explotar son conocidos (53hPa; 217K) el volumen se obtiene de modo automático a través de la ecuación de estado de los gases ideales. Resulta un volumen $V_{est}=26,26m^3$ y un radio $r_{est}=1,843m$. Para ello se ha supuesto que la tensión del látex no modifica significativamente la presión en el interior del globo admitiendo una presión interior idéntica a la exterior. Es sabido que la tensión en un globo es sensiblemente mayor en el momento de comenzar el llenado y cuando está próximo a estallar (On the inflation of a rubber balloon, 2016) (Vary, 2017). En ese caso el volumen real podría ser ligeramente menor al aquí presentado. En el [Anexo XIV](#) dedicado a los simuladores se reflejó (figura 70) que para un globo de estas características el diámetro de estallido apuntado por el fabricante era de 4,12m y, por tanto, un radio de 2,06m.

También puede estimarse la altura que podría haber ascendido el globo asumiendo estos datos. De nuevo la ecuación de estado permite despejar la relación P/T. Los sondeos de Madrid o Santander¹⁴ permiten tantear buscando los valores que verifiquen dicha relación. En ambos casos resulta muy fácil llegar a unos valores de la altitud en torno a los 22700m que era la altitud máxima que se preveía para esta experiencia.

¹⁴ Datos facilitados por las Delegaciones de Aemet en Cantabria y Madrid



ANEXO XIV: Consideraciones sobre los cálculos mediante simulación

En el epígrafe correspondiente a la ejecución del lanzamiento se hace un análisis detallado de los datos, variables o medidas con los que finalmente se realizó la liberación del globo. Para los intereses de este apartado basta con una enumeración de esos valores.

El globo fue lanzado con una *carga de Helio* de 308,6 g

La *temperatura* en ese instante era de 24 °C (297 K)

La *presión atmosférica* registrada por la sonda 931 hPa

El *radio efectivo* del globo (se explica en el apartado de lanzamiento) 0,7876 m

Masa de la cubierta de látex del globo 350 g

La *masa total* del globo, con Helio y carga útil 1,4786 kg

Masa molar del aire $M=0,02897$ kg/mol

Masa molar del Helio $M=0,004$ kg/mol

Constante de los gases ideales $R=8,314$ J/K.mol

Para utilizar la terminología propia de los simuladores, es necesario definir algunos conceptos previos,

- Empuje bruto: Representa la diferencia entre el empuje aerostático y el propio peso del Helio que lo genera. Se determina mediante la siguiente relación (en unidades de masa),

$$E_B = (\rho_{aire} - \rho_{helio}) \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (1)$$

- La densidad del aire y del Helio se obtienen en base a la expresión (2 del [Anexo V](#)) por sustitución directa de los valores mostrados anteriormente. Con todo, resulta un *empuje bruto* de 1,926 kg.
- Empuje libre: Se denomina así a la cantidad que se obtiene después de restar al empuje bruto la masa de la carga útil y la del propio látex. En definitiva, representa el verdadero valor de la fuerza ascensional neta (expresada en unidades de masa) de todo el sistema que se lanza. En este caso se tiene un *empuje libre* de 0,756 kg.
- Empuje neutro: Expresa el valor del empuje bruto después de restarle la masa del látex del globo, es decir, permite determinar la fuerza ascensional neta sin tener en cuenta la carga útil. Dicho con otras palabras, nos informa de la máxima carga que podría elevar el globo en régimen de flotabilidad neutra. Para el presente caso se tiene un *empuje neutro* de 1,576 kg.



- Tasa de ascenso: Es simplemente la velocidad de avance vertical en el seno de la atmósfera. En todos los simuladores encontrados, como se comenta a continuación, se supone una velocidad de ascenso constante.
- Tiempo de ascenso y diámetro de explosión: Son conceptos íntimamente relacionados ya que el tiempo de ascenso queda supeditado a la velocidad y al diámetro con el cual el globo sufre la explosión. Este último dato suele ser proporcionado por los fabricantes y, estadísticamente, es bastante fiable.
- Coeficiente aerodinámico C_d : Es un número adimensional que se obtiene de modo experimental dado lo compleja que resulta su modelización. Solo en regímenes muy uniformes y con geometrías muy elementales se pueden hacer cálculos formales. En situaciones como la presente, el globo atraviesa zonas donde la transición de una a otra implica cambios en la dinámica de fluidos y en la propia geometría del globo. Por todo, es necesario adoptar un coeficiente medio. En la mayoría de manuales generalistas se establece para la esfera un valor de 0,5 mientras que en textos más especializados se suele tomar 0,47, valor que corresponde a un régimen muy concreto que tiene bastante similitud con la situación en la que transcurre la mayor parte del vuelo de este globo. Todo ello se debate ampliamente en el apartado de discusión y en el [Anexo IV](#).

Todas estas cuestiones conforman un cuerpo de datos de gran importancia a la hora de programar la experiencia. El tiempo y la altura alcanzada serán determinantes, por ejemplo, para decidir el grado de protección al frío que necesitarán los equipos o el tipo de baterías que se montarán.

En la red existen cantidad de aplicaciones online o sencillas hojas de cálculo que permiten realizar dichas estimaciones. Por tanto, será interesante analizarlas en profundidad y comparar con las previsiones del tratamiento formal para ver el grado de fiabilidad de estos recursos. Se puede ver que la mayoría aplica un mismo motor de cálculo. El más completo quizá es el desarrollado por Steve Randall para la firma del fabricante de globos Totex (Kaymont). A través de una hoja de cálculo de libre acceso se pueden obtener todos los datos mencionados¹⁵.

El aspecto que tiene la hoja después de introducir los datos de esta experiencia es el que muestra la siguiente figura.

¹⁵ Por ejemplo en el siguiente enlace:

https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiY0L3R_bbkAhVAA2MBHfOECLAQFjAJegQIAhAC&url=http%3A%2F%2Fftp.demec.ufpr.br%2Ffoguete%2Fbibliografia%2FPlanilha-Totex%2520Balloon%2520Burst%2520Estimator.xlsx&usq=AOvVaw1rFdrerGIyVo3Zb0TN9PnR



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Totex Balloon Burst Estimator - by Steve Randall																	
	Gas		Chosen Gas Density(Kg/cu m)		Air density at 0C,101 kPa		Air Density Model							Gas density			
	Helium		0.1508		1.09227		7238.3							Hydrogen	0.0899	at 0C,101 kPa	
														Helium	0.1786	at 0C,101 kPa	
8	Launch Vol (cu m)	Launch Dia (m)	Area (sq m)	Balloon (g)	Payload (g)	Burst Dia (m)	Burst Volume (cu m)	Burst Volume Ratio	Burst height (m)								
9	2.04647	1.5752	1.948772	350	820	4.12	36.617633	17.89307	20878								
11	Gross Lift(Kg)	Free Lift (Kg)	Free Lift (N)	Balloon Cd	Ascent Rate (m/sec)	Ascent rate (ft/min)	Neutral Lift Kg	Time to burst (min)	Burst Height (ft)								
12	1.92669	0.75669	7.42313	0.47	3.852247	758.1221	1.5766901	90.32933	68481								
15	Notes:																
16	Fill in the green cells - results in yellow cells (Pink cells are intermediate calculations, Tan cells are constants)																
17	Based on Kaymont Totex Sounding Balloon Data																
18	Model tends to under estimate balloon burst for small balloons by upto 3.5% - and over estimate for big balloons by upto 3.5%																
19	Air density model based on NRLMISE Standard Atmosphere Model - good to 80km																
21	Totex Balloon Data:																
22	Balloon (g)	200	300	350	450	500	600	700	800	1000	1200	1500	2000	3000			
23	Burst dia (m)	3.00	3.78	4.12	4.72	4.99	6.02	6.53	7.00	7.86	8.63	9.44	10.54	13.00			
24	Cd	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3	0.3	0.3	0.3	0.25	0.25	0.25	0.25			

Ilustración 71. Estimación del simulador Nearspace para el lanzamiento

Como puede verse, los datos relativos a los distintos empujes son totalmente exactos y coincidentes con los que resultan del cálculo riguroso con las fórmulas correspondientes, como la (1) o la ecuación de estado de los gases ideales.

En cuanto al tiempo de ascenso deberá haber discrepancias, dado que los tratamientos aplicados en este estudio y en el simulador son, conceptualmente, diferentes. Como se desprende de la fórmula (7 del Anexo III), la velocidad de ascenso no es en ningún caso constante y además aumenta con la altitud. Esto, afecta de manera directa al tiempo de vuelo y por ello la información que proporciona el simulador sobre esta variable no debe ser considerada en absoluto como correcta.

Por otra parte, no diferencia entre la atmósfera con una caída lineal de la temperatura por debajo de la tropopausa y la que mantiene un valor relativamente constante por encima de esta frontera. La idea es simple, el simulador adopta como velocidad de ascenso la que resulta de la constante k de la fórmula (7 del Anexo III), o sea, la velocidad inicial en el punto de lanzamiento. Esto supone una simplificación más que severa dado que la velocidad de ascenso de un globo de estas características se ve incrementada hasta en un 50% en los tramos superiores. Debería distinguir entre dos zonas de movimiento y desarrollar las fórmulas que relacionan la dependencia de la velocidad con la altitud en ambas.

En un ascenso de unos 20800m el simulador proporciona un tiempo de vuelo de unos 5400 s (90 min) mientras que mediante el desarrollo de las fórmulas (1 y 2 del Anexo VI) resultarían unos 4510 s (75,17 min). La diferencia es elocuente y, por tanto, deberá ser una de las cuestiones que se aborden en las conclusiones y análisis de resultados. Los datos reales del movimiento del globo arrojarán luz sobre la conveniencia o no de tomar en consideración algunos valores de este simulador.

Existen otras alternativas como la que proporciona el proyecto High Altitude Science. Además de una buena descripción del proyecto ofrece esta aplicación online:

<http://tools.hightitudescience.com/>



En este caso no se indica que motor de procesamiento de datos utiliza. Si se introducen los valores del tipo de globo, carga útil y empuje libre el programa devuelve una imagen como esta:

Input	Output
Balloon Size (grams) 350	Required Helium (in cubic feet) 69.2404508984066
Payload Weight (grams, 1-20000) 820	Estimated Burst Altitude (in meters) 23210
Positive Lift (grams, 1-20000) 756	Average Ascent Rate (in meters/second) 5.056128441355576
	Ascent Time (in minutes) 76.5078137986584

a High Altitude Science project

Ilustración 72. Simulador de High Altitude Science

En cualquier caso, los datos que devuelve después de ingresar los del lanzamiento del globo aquí estudiado no son del todo coincidentes. Presenta, por ejemplo, un volumen de Helio ligeramente inferior a la que correspondería a estos valores. Tampoco se puede concluir nada más dado que no se proporcionan los datos de presión y temperatura de los que parte. Sí se puede ver que, a diferencia del simulador anterior, estima unos datos de tiempo de ascenso sensiblemente inferiores a los que se obtienen de las fórmulas (1 y 2 del [Anexo VI](#)), unos 5 minutos para las alturas aquí calculadas. Nuevamente, en la discusión se comparará con los datos reales del vuelo.

Otro simulador muy extendido en la red es el de [Habhub.org](#). Aquí se permite introducir el tipo de globo, carga útil, altura de estallido y coeficiente aerodinámico. Para poder comparar con la aplicación anterior se establece una altura de 20878 m. Se puede ver que también devuelve valores excesivamente elevados del tiempo de ascenso. El hecho de fijar una altura de estallido condiciona el valor del volumen de lanzamiento y por tanto la carga de Helio. No obstante, propone un volumen de 2,05 m³ totalmente concordante con la que se utilizará en este proyecto. Sin embargo, el tiempo estimado es muy superior al que determinan las fórmulas. Como puede verse en la captura de pantalla, el problema ya arranca de la imposibilidad de modificar la densidad del gas que lo propulsa, permitiendo solamente modificar la del aire. Con valores similares a los del lanzamiento real obtiene una velocidad media un poco baja. El problema reside en que tampoco muestra cuál es su motor de cálculo con lo que tampoco resulta útil para el propósito actual.

Esta es la dirección:

<http://habhub.org/calc/>

Y esta es la imagen que proporciona:



Result			
Burst Altitude:	20878 m	Time to Burst:	86 min
Ascent Rate:	4.05 m/s	Neck Lift:	1740 g
		Volume:	2.05 m ³
			2047 L
			72.3 ft ³

Constants (Advanced)		
Gas	Air Density (kg/m ³)	<input type="checkbox"/> Burst Diameter (m)
Helium	1.2	7.86
Gas Density (kg/m ³)	Air Density Model	<input checked="" type="checkbox"/> Balloon Cd
0.1786	7238.3	0.47
	Gravitational Acceleration (m/s ²)	
	9.80665	

Ilustración 73. Simulador de Habhub

Las dudas sobre la eficacia de cada simulador se solucionan con cierta comodidad comparando los datos que proporciona con los que resultan del estudio analítico. Merece la pena detenerse en el predictor de vuelo-estallido-caída que ofrece de nuevo habhub.org (en el epígrafe dedicado a la predicción de la trayectoria del globo de la presente memoria se estudia en profundidad esta cuestión). En lo referido al tiempo de vuelo el predictor permite modificar algún dato más, como la densidad del Helio. Así, introduciendo los valores que se manejaron en la hoja de cálculo de Totex se puede ver que la coincidencia es total. Esta es la captura de pantalla:



Ilustración 74. Predictor de trayectoria de vuelo de Habhub.org.



El tiempo de ascenso, volumen inicial, empuje libre o velocidad de ascenso son idénticos. Se puede concluir que todos los simuladores encontrados en la red tienen como principal problema el hecho de no considerar el carácter variable de la velocidad de ascenso. Resulta trivial comprobar que la velocidad que ofrecen no es una velocidad media sino la velocidad en el instante del lanzamiento, proporcionada por la fórmula 7 del [Anexo III](#), asumiendo ese valor como constante. A pesar de que no resultan tiempos excesivamente desviados, resulta conceptualmente poco aceptable admitir una velocidad constante, la cual solo podría darse en una atmósfera uniforme y en desplazamientos de unos pocos metros.

De igual modo, para determinar la altitud de estallido realizan el cálculo de la presión final a través de la ecuación de estado de los gases ideales para posteriormente asignar una altura a partir de la fórmula barométrica (6bis del [Anexo V](#)). Obviamente, lo correcto sería realimentar esa fórmula con las temperaturas intermedias y, de ese modo, ir calculando las alturas alcanzadas en pequeños intervalos. Dado que el simulador solo dispone de los datos del lanzamiento utiliza la citada fórmula entre las presiones inicial y final, lo cual introduce errores próximos al 10%. Sería más correcto dividir el cálculo en dos etapas, por un lado hasta la tropopausa y por otro hasta el estallido final a través de la fórmula para atmósfera isoterma (4bis del [Anexo V](#)). En el presente trabajo se muestra la excelente concordancia entre los datos obtenidos mediante este método y los del sondeo.

ANEXO XV: Obtención de evidencias sobre la esfericidad de la Tierra

Las características técnicas de los equipos de grabación utilizados, no posibilitan otro medio para determinar la forma de la Tierra que la extracción de ciertas conclusiones lógicas. Más que evidenciar la esfericidad de la Tierra, constatan su curvatura y la imposibilidad geométrica de su forma plana.

A partir de la identificación de determinadas localizaciones y relacionándolas con la altitud desde la que se han tomado sus imágenes, se puede deducir una depresión del horizonte sólo posible si la superficie de la Tierra no es plana, sino que presenta un grado de curvatura suficiente para permitir un incremento del alcance visual a medida que aumenta la distancia del observador desde el suelo.

Así, un contorno como el de la costa de Las Landas en Francia, resulta invisible a determinada altitud a pesar de ser perfectamente visibles las aguas del Golfo de Vizcaya, por encima de las cuales se aprecia el horizonte. Superada cierta altitud, la progresiva depresión del horizonte permite ver la costa a mucha mayor distancia, hasta superar los 400 kilómetros de distancia sobre la superficie.

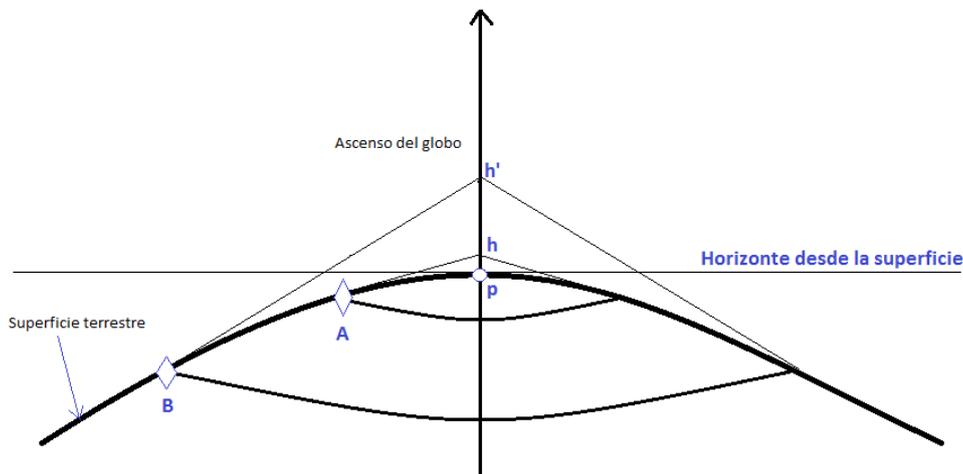


Ilustración 75. Depresión del horizonte. (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 75, se aprecia que a medida que el observador se eleva desde el punto “p” hasta la altitud “h”, su alcance visual queda limitado hasta el punto “A”. Cuando ha alcanzado el punto “h”, su alcance visual, merced a la curvatura terrestre, puede progresar hasta el punto “B”. El ángulo ApB es conocido como la depresión del horizonte entre los puntos h y h’, y es, obviamente, proporcional a la altitud.

Existe una fórmula que nos permite determinar el alcance visual en función de la altura del observador con respecto a la superficie terrestre y que se obtiene trigonométricamente a partir del triángulo formado por el centro de la Tierra, el punto de observación y el punto de máximo alcance visual desde ese punto, como se ve en la siguiente figura.

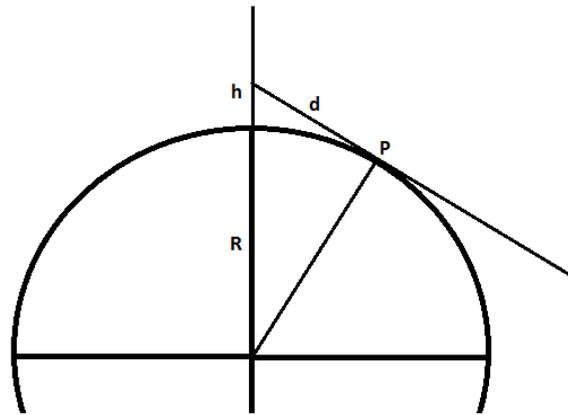


Ilustración 76. Alcance visual. (Fuente: elaboración propia).

La fórmula, fácilmente deducible, es:

$$d = \sqrt{(2Rh + h^2)}$$

A una altura de 20.750 metros y supuesto un radio terrestre de 6.371 kilómetros¹⁶, se obtiene una distancia aproximada al horizonte de 563 kilómetros. A partir de las imágenes obtenidas, trataremos de comprobar si efectivamente hemos alcanzado ese horizonte.



Ilustración 77. Captura de imagen a 10.000 metros aproximadamente.

En la imagen obtenida en la grabación y referenciada aproximadamente a los 10.000 metros, se aprecia como límite del horizonte hacia el norte el contorno de la costa cantábrica, no siendo posible percibir ningún detalle orográfico hacia el este a mayor distancia. En la figura siguiente, tomada al superar los 15.000 metros, se pueden apreciar los contornos del Golfo de Vizcaya.

¹⁶ Habitualmente, se suele añadir un 20 por ciento al radio terrestre para tener en cuenta la refracción de la visual que supone un incremento en la distancia. Existen otros procedimientos de cálculo que introducen este factor de otras maneras (Vary, 2017) pero el concepto siempre se traduce en un alcance mayor al obtenido sin considerar la refracción.



Ilustración 78. Imagen captada a 15.000 metros aproximadamente.

Si ascendemos aún más, hasta los límites de nuestra experiencia en el entorno de los 20 kilómetros, vemos que los perfiles de la costa francesa se definen ya de forma notable, al hacerse perceptible el horizonte a mayor distancia, como vemos en la siguiente figura.



Ilustración 79. Imagen capturada a 20.000 metros aproximadamente.

Para confirmar la orografía francesa y constatar ese alcance de 563 km, podemos hacer una comparación con las estructuras nubosas que se han captado en las imágenes satelitales. Como vemos, son identificables en las imágenes que, simultáneamente al lanzamiento y ascenso del globo, recogían los satélites meteorológicos en servicio.

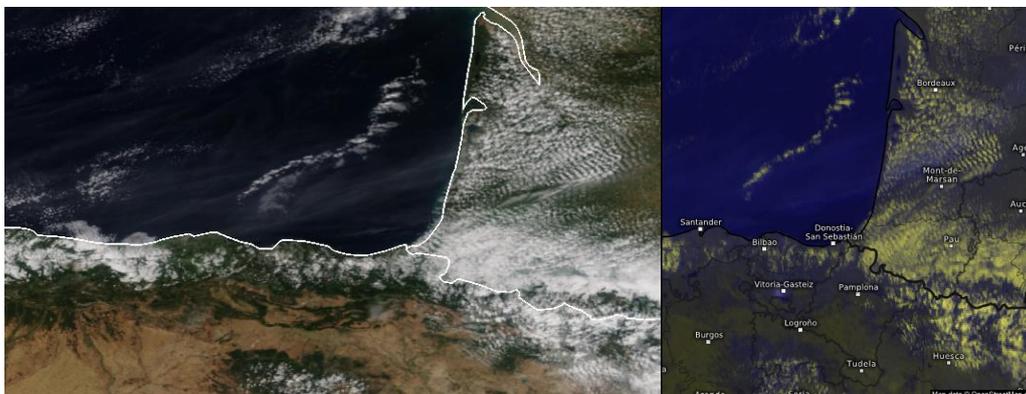


Ilustración 80. Imágenes HRVIS del Meteosat a las 08:00 UTC del día 10 de agosto de 2018. Fuente: Aemet y weather.us



ANEXO XVI: Programación electrónica, recogida de datos mediante placa Arduino

Cuando se quiere enviar algo a la estratosfera en el contexto de una actividad científica hay una magnitud que se quiere tener controlada por encima de todas las demás, esa magnitud es la altitud. La mayoría de efectos deterministas que se pueden observar a grandes alturas (densidad del aire, temperatura, curvatura terrestre observable, etc.) se pueden parametrizar con la altitud a la que se hace la medida, por ello esta magnitud tiene una importancia única a la hora de entender el resto de datos que se están tomando. Además, puede dar otra información interesante desde un punto de vista logístico como la velocidad de ascensión y descenso. Se pueden encontrar varios métodos a la hora de determinar la altitud de un objeto, pero uno de ellos destaca por su sencillez y fiabilidad, la medición de la presión atmosférica. Como se ha visto en el [Anexo V](#) la presión atmosférica en cualquier punto de la atmósfera queda perfectamente determinada por su altitud, y las ecuaciones 4 y 6 de dicho anexo permiten una conversión biyectiva entre la altitud y el la presión. Por estas razones se consideró necesario que se incluyese un sensor de presión (un barómetro) fiable a bordo del paquete.

Otra magnitud que se consideró interesante medir durante el viaje fue la temperatura tanto fuera del paquete como dentro. La temperatura fuera del paquete representa la temperatura de la capa atmosférica en la que se esté, esta información permite la observación de diversos fenómenos atmosféricos como el rebote térmico de la tropopausa. La medición de la temperatura dentro del paquete tiene una finalidad de control sobre los datos recogidos: todos los instrumentos que se utilizan en este proyecto tienen rangos térmicos de actuación amplios para ser usados en la superficie del planeta. Sin embargo, a 20 km de altitud la temperatura estará bien fuera de esos rangos y se tienen que instalar mecanismos para evitar un enfriamiento excesivo. Un termómetro interior garantiza que todos los datos tomados por los instrumentos fueron registrados en el rango térmico correcto.

Para coordinar la toma de valores de los barómetros y termómetros se utilizó un micro-controlador Arduino que hacía mediciones cada cierto tiempo fijo, estos registros se iban almacenando en una tarjeta SD montada sobre un escudo de la Arduino para este propósito.

Controlador

Para la coordinación de los diversos instrumentos de toma y almacenamiento de datos se necesitaba utilizar o bien un microordenador o bien su versión más básica, un micro-controlador. Puesto que el peso del paquete era un criterio crítico para el éxito del proyecto, que la lógica de la obtención y registro de datos era muy sencilla y que la comunicación con los instrumentos elegidos era de muy bajo nivel se decidió usar un micro-controlador. Entre toda la oferta de micro-controladores del mercado se decidió utilizar una Arduino Uno (Arduino, 2018) por su amplia compatibilidad con protocolos de comunicación, por su amplia comunidad y por su accesibilidad a no iniciados.



Ilustración 81. Placa Arduino uno rev3.

El Arduino Uno funciona con una tensión de 9V por lo que una simple pila de ese voltaje es suficiente. Usando el código final y teniendo todos los instrumentos conectados se comprobó que una pila de 9V Duracell aguantaba durante unas 12 horas seguidas, duración muy superior al del tiempo estimado de vuelo que es inferior a las 3 horas. La vida de las baterías químicas (como las pilas) tiende a degradarse rápidamente a bajas temperaturas por lo que era necesario que la pila se encontrase dentro del paquete a una temperatura superior a los 0 grados.

Almacenaje de datos

La Arduino Uno no viene con soporte para tarjetas SD por defecto (ni para ningún otro sistema de almacenamiento), pero ésta funcionalidad puede ser fácilmente añadida utilizando un escudo. Los escudos son placas hechas siguiendo un estándar que se encargan de extender la funcionalidad de un microcontrolador compatible a través de una instalación sencilla y directa. En este caso se usó el modelo Sparkfun MicroSD Shield (Sparkfun, 2018).

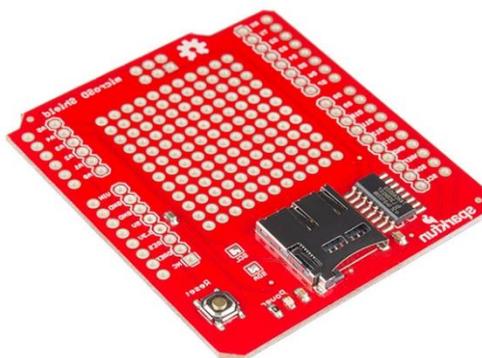


Ilustración 82. Placa Sparkfun MicroSD Shield

Puesto que la intención era almacenar 3 datos cada 3 segundos, la velocidad de transferencia de datos no era relevante para este caso. Por ello, modelos concretos de SD u optimizaciones de código no tuvieron que ser tenidos en cuenta.

Barómetro y termómetro interior

Como se ha explicado previamente el barómetro era una pieza clave para el proyecto, por ello era necesario que fuese capaz de medir con precisión en el rango de presiones que van desde la presión en la superficie terrestre (~ 1 atm.) hasta la presión a 20 km de altitud (~ 1/20 atm). El límite inferior de este rango de presiones es bastante extremo y la mayoría de barómetros comerciales no lo cubren, es necesario acudir a un distribuidor de electrónica especializado para encontrar uno. El elegido fue el Honeywell HSCDANN015PA2A3 (Digi-key, 2018) que según su hoja de especificaciones es capaz de medir hasta 0 atm y por tanto, el valor de presión más bajo que puede registrar se corresponde con su resolución que es de $6 \cdot 10^{-5}$ atm, muy por debajo de lo que necesitamos. Además, este sensor viene también equipado con un termómetro que, aunque no es capaz de aguantar puntos extremos, dado que irá instalado dentro del paquete (el paquete no es hermético así que la presión dentro y fuera será la misma) se puede usar como termómetro de control para los otros instrumentos (hay que recordar que la temperatura dentro del paquete no debería bajar de los 0 C).

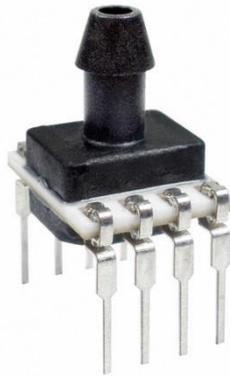


Ilustración 83. Sensor de presión

Este barómetro utiliza como protocolo de comunicación el estándar I2C, se utilizará para comunicarse con el micro-controlador siguiendo el siguiente esquema:

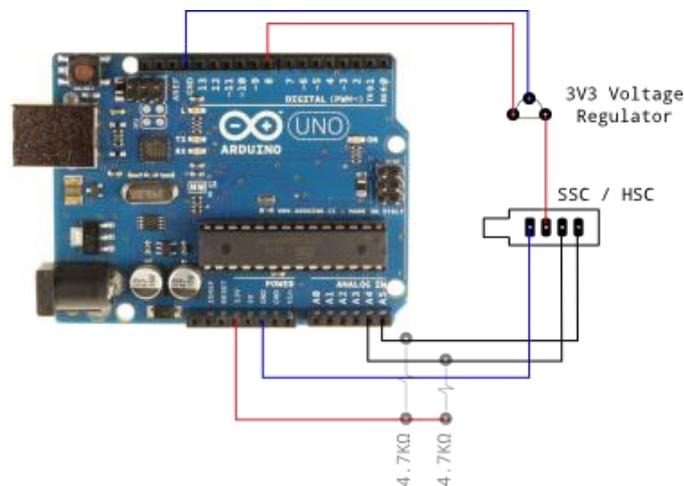


Ilustración 84. Esquema de comunicación según protocolo estándar I2C

Termómetro exterior

El termómetro exterior al igual que el barómetro debe ser capaz de medir las temperaturas extremas que se pueda encontrar a 20 km de altitud. La teoría dice que la temperatura más baja que se encontrará será en la tropopausa justo cuando empieza el rebote térmico, esta temperatura de mínima es de -56 C. Encontrar termómetros comerciales que cubran esa marca es difícil y caro, sin embargo, es fácil encontrar sensores que lleguen hasta los -55 y se consideró que sería lo suficientemente bueno para el proyecto.

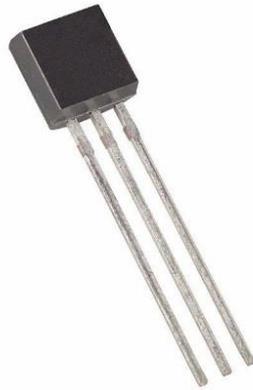


Ilustración 85. Sensor exterior de temperatura

El sensor elegido fue DS18B20 de Maxim Integrated (Digi-key, 2018) que es muy popular por ser fiable y barato. Utiliza el protocolo de comunicación 1-Wire que es un estándar privado, pero fuertemente extendido y con buena compatibilidad con Arduino. La integración con el micro-controlador se hizo siguiendo el siguiente esquema:

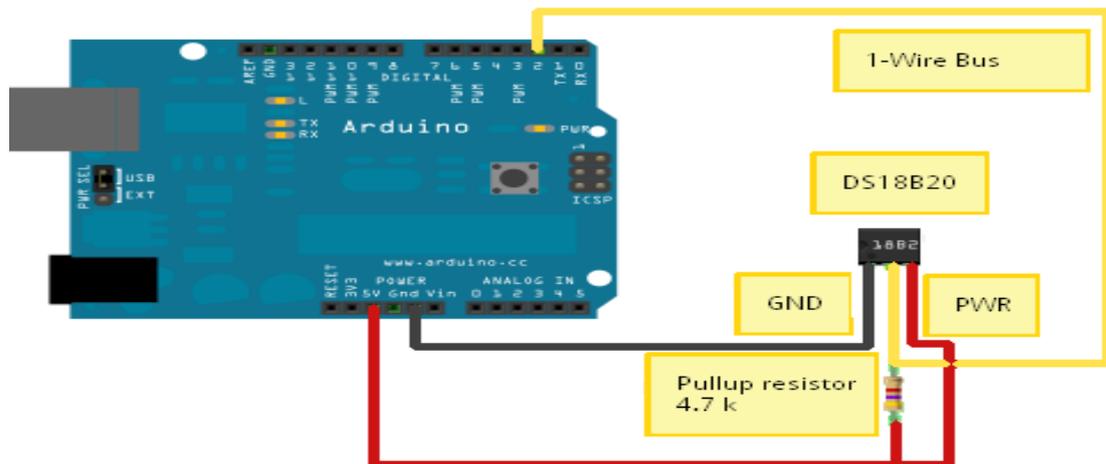


Ilustración 86. Esquema de integración del sensor de temperatura

En el montaje final, el sensor fue metido en una cápsula de metal por protección y los cables con un recubrimiento de goma.



Ilustración 87. Protección y recubrimiento del sensor de temperatura.

Software

Cada una de las integraciones de los sensores con la placa Arduino es independiente y no se afectan las unas a las otras, por ello los esquemas que se han mostrado anteriormente pueden combinarse sin hacer ninguna modificación.

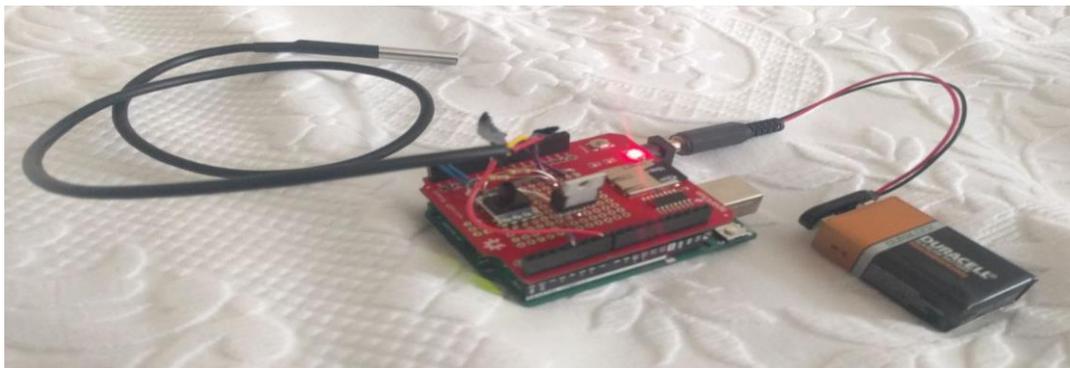


Ilustración 88. Componentes (sensores, placa y batería) conectados

Dada la escala de tiempos que se estimó para el tiempo de vuelo total del paquete se consideró que una toma de datos cada 2-3 segundos sería suficiente. Por tanto, la labor del micro-controlador sería:

1. Acceder al sensor de presión y recuperar presión y temperatura interna
2. Guardar presión y temperatura interna en la SD
3. Acceder al termómetro exterior y recuperar su valor
4. Guardar valor de temperatura externa en la SD
5. Esperar

Acceder al termómetro exterior añade un retraso de 1 s y se puso un tiempo de espera de 2 s, por lo que todo el bucle se repite cada 3 segundos.

Para la programación del micro-controlador se utilizó el SDK oficial de Arduino así como IDE para desarrollar la lógica. Como librerías se utilizaron SPI.h, SD.h, Wire.h y OneWire.h que se pueden encontrar en la biblioteca oficial de Arduino y SSC.h que es necesario descargar de la web de su propietario (2018) e instalar manualmente. En el anexo se puede consultar el código fuente que se utilizó en el lanzamiento.



Código

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <SSC.h>
#include <OneWire.h>
// create an HSC sensor with I2C address 0x28 and power pin 4.
// create an OneWire sensor with power pin 13.
SSC hsc(0x28, 4);
OneWire global_ds(7);
// The Sparkfun microSD shield uses pin 8 for CS
const int chipSelect = 8;
const int ERROR_VALUE = -100;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  setupSDCard();
  setupPressureSensor(hsc);
  String headersString = "t/ms;T/C;P/hPa;Sensor";
  writeStringToSD(headersString);
}
void loop() {
  // update pressure / temperature
  hsc.update();
  int hires_pressure = hsc.pressure();
  int int_temp = hsc.temperature();
  printSD(millis(), "HSCDANN015PA2A3", int_temp, hires_pressure);
  int hires_ext_temp = ReadingTemp(global_ds);
  if (hires_ext_temp != ERROR_VALUE) {
    printSD(millis(), "ds1822", hires_ext_temp, 0);
  }
  delay(2000);
}
void printSD(unsigned long time_from_start, const char* sensor, int temperature, int pressure) {
  String sep = ",";
  String data_line = time_from_start+sep+temperature+sep+pressure+sep+sensor;
  writeStringToSD(data_line);
}
int setupPressureSensor (SSC & hsc_ref){
  Wire.begin();
  // set min / max reading and pressure (in atm), see datasheet for the values for your sensor
  hsc.setMinRaw(0.1*16383);
  hsc.setMaxRaw(0.9*16383);
  hsc.setMinPressure(0.0);
  hsc.setMaxPressure(1034.214); // = 15 psi = 1.020689 atm = 1034.214 hPa
  // start the sensor
  return hsc.start();
}
int ReadingTemp(OneWire & ds) {
  byte i;
  byte present = 0;
  byte data[2];
  byte addr[8];
  int temp;

  if ( !ds.search(addr) ) {
```



```
        ds.reset_search();
        return ERROR_VALUE;
    }
    ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0x44,1);
    delay(1000);
    ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0xBE);
    data[0] = ds.read();
    data[1] = ds.read();
    temp = data[1];
    temp <<= 8;           /* shift left eight bits */
    temp += data[0];      /* add second byte of temperature */
    temp >>= 4;          /* shift right by five to divide by 16 */
    ds.reset_search();
    return temp;
}
void writeStringToSD(String & string){
    // open the file. note that only one file can be open at a time
    File dataFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
        dataFile.println(string);
        dataFile.close();
        // print to the serial port too:
        Serial.println(string);
    } else {
        Serial.println("error opening datalog.csv");
        string = "----x "+ string;
        Serial.println(string);
    }
}
void setupSDCard() {
    Serial.print("Initializing SD card...");
    // make sure that the default chip select pin is set to
    // output, even if you don't use it:
    pinMode(10, OUTPUT);
    // The chipSelect pin you use should also be set to output
    pinMode(chipSelect, OUTPUT);
    // see if the card is present and can be initialized:
    if (!SD.begin(chipSelect)) {
        Serial.println("Card failed, or not present");
        return;
    }
    Serial.println("card initialized.");
}
```



Conclusiones

En un proyecto tan transversal, dilatado y multidisciplinar, la cantidad de conclusiones a extraer es ingente. Para nosotros resulta particularmente importante encontrar una manera de compartirlas que no sólo sea formal y científica, sino eficaz y amena. Hemos buscado facilitar y ordenar el proceso de lectura para que, el que se aproxime a esta memoria desde cualquier perspectiva, pueda aprovechar aquello que le interese sin mayor complicación.

Así, hemos clasificado las conclusiones en tres categorías, según el enfoque de las mismas. El criterio de agrupación en cada categoría se explica al comienzo de los epígrafes respectivos.



Conclusiones de enfoque científico

En este apartado se agrupan aquellas conclusiones obtenidas a partir de los supuestos científicos de los que parte la experiencia. Se trata de resultados obtenidos a partir de cálculos, ensayos o de la propia culminación de la actividad de campo del proyecto. Confirman o no las hipótesis planteadas o surgen del análisis profundo de la información obtenida.

Después de realizar los cálculos en las etapas previas y tras la culminación del lanzamiento y el análisis de la información generada, se pueden extraer una serie de conclusiones que relacionamos aquí. En cada punto, procuramos añadir las partes de esta memoria en las que se pueden sustentar las conclusiones:

- El objetivo principal con el que nació este proyecto era el poder lanzar un globo a la estratosfera provisto de cámaras y recuperarlo junto al material grabado. Desde ese punto de vista, el éxito ha sido completo y refuerza lo adecuado de todos los cálculos y pruebas previas que se han presentado en este trabajo. Recuperar el globo no ha sido fruto de la casualidad ni de la suerte sino de la ejecución de un protocolo que ha demostrado ser sumamente eficaz y que eleva las posibilidades de éxito para cualquier lanzamiento futuro. De igual modo, los cálculos y estimaciones han resultado completamente oportunos y se ha conseguido el segundo objetivo que era el de superar la frontera de los 20.000 m de altitud.
- La modelización en base a las fórmulas de la resistencia aerodinámica, las ecuaciones de los gases ideales y las fórmulas barométricas resultan más que aceptables para cualquier estimación de variables como altitud, volumen del globo o tiempo de ascenso. En particular, las fórmulas barométricas muestran un grado de precisión para la determinación de alturas comparable, prácticamente, a la de un GPS.
- A pesar de haber utilizado el denominado “método directo” como producto del fallo de un sensor, éste resulta extremadamente preciso en la determinación de la altitud del globo. Su sencillez, en base a las condiciones del punto de lanzamiento, lo hace de especial interés para acometer los cálculos con estudiantes de Educación Secundaria. Incluso, metodológicamente resulta más coherente para analizar la potencia de predicción de una fórmula no tener que realimentar continuamente con datos reales intermedios.
- La predicción del punto de aterrizaje que ofrecieron los simuladores y el calculado formalmente (en base a las predicciones de vientos para ese día) resultaron muy concordantes con el punto real donde cayó. Por tanto, se propone como un cálculo más para futuros lanzamientos. Sin embargo, tras analizar la divergencia entre ambos, apuntamos como causa de la misma la precisión en el cálculo de la hora de lanzamiento. La constante evolución de las circunstancias meteorológicas, determina la deriva del globo durante su vuelo. Para la estimación obtenida a 09:00 UTC la concordancia direccional del desplazamiento es muy buena, correspondiéndose con la hora final real del lanzamiento. Sin embargo, para la estimación sobre las 12:00 UTC, el pronóstico incluye un desplazamiento de la vaguada hacia el este y un incremento notable de la componente norte en el viento



que resulta en un punto estimado de aterrizaje bastante más al sur del realmente alcanzado. La divergencia en deriva, se debe también en parte a la estimación errónea en el tiempo de vuelo, sobre todo al suponer una velocidad de caída menor de la realmente alcanzada por los equipos. Resultaba excesivamente complejo tratar de modelizar la caída tras el estallido. Dicho proceso supondría estimar la eficacia de frenado del paracaídas para unos elementos singulares y de comportamiento aerodinámico no estudiado y optamos por suponer velocidades de descenso próximas a las registradas en radio-sondeos meteorológicos.

- La elección de un coeficiente aerodinámico medio (o efectivo) para todo el trayecto resulta fundamental para cualquier predicción que se quiera efectuar. El valor escogido de 0,47 ha resultado ser un dato muy correcto para este trabajo. Su estudio en lanzamientos similares podrá aportar más luz sobre el valor más apropiado.
- El desajuste de la velocidad en algunas zonas se podría atribuir a los distintos tramos de variación del coeficiente aerodinámico y haber asumido en este trabajo un solo coeficiente promedio.
- La curvatura de la superficie terrestre es claramente perceptible tanto aplicando software de corrección de distorsión como sin aplicarlo. La comparación de imágenes con el horizonte sobre el eje óptico (centro geométrico de la imagen) debe ser siempre la metodología a utilizar para establecer conclusiones coherentes con respecto a las imágenes.



Conclusiones de enfoque técnico

En este apartado, se incluyen todas aquellas consideraciones extraídas a partir de la aplicación de todas las soluciones técnicas que se han ido adoptando. Las contemplamos en un sentido amplio, no sólo la mera elaboración de los equipos necesarios para el lanzamiento, sino también posibles reflexiones de tipo metodológico a la hora de desarrollar el proyecto, evaluando la idoneidad de las soluciones adoptadas durante su filmación, su organización, el planteamiento de tareas de apoyo o cualesquiera otra que pudieran haber estado ocultas hasta el último momento.

Conclusiones derivadas de la construcción y disposición de los equipos e instrumentos

Tras la experiencia, se han constatado una serie de cuestiones que, o bien confirman lo supuesto o planeado al inicio, o bien obligan a la reconsideración de algunas de las soluciones adoptadas para afrontar los retos técnicos. A continuación, se relacionan y explican someramente, pero su sustentación en detalle se puede encontrar en los apartados que anteceden a este de Conclusiones, tanto en la descripción del proyecto como en los anexos de esta memoria.

- Sin duda el elemento que debería ser remplazado para un futuro lanzamiento es la sonda de temperatura exterior. Al margen de la exposición a la radiación solar directa, mostró una inercia térmica tan alta que ofrecía tiempos de respuesta demasiado lentos para las condiciones de navegación del globo. Por tanto, se trataría de buscar en el mercado sensores con gran rapidez de respuesta. En cualquier caso, esta es una prueba que no se realizó en los ensayos previos y que, lógicamente, se incorporará al protocolo de cualquier futura experiencia. En cuanto a la sonda de temperatura interior el interés es más anecdótico después de haber comprobado que la temperatura del habitáculo se mantiene en valores muy razonables para el correcto funcionamiento de los equipos.
- En la misma línea cabe detenerse a considerar la influencia de la radiación solar directa sobre la temperatura del gas del globo. Una propuesta de interés sería realizar un lanzamiento nocturno de un globo similar en el mismo día y evaluar el grado de coincidencia entre los valores del sondeo y los estimados por las ecuaciones en esta situación.
- Cabe señalar que en este estudio no se ha considerado la posibilidad de que exista pérdida de gas a través de los poros de la cubierta del globo. A pesar de que sin ninguna duda existirá, resultaría casi imposible su evaluación además de ser muy poco significativa.
- La excesiva rotación del habitáculo con las cámaras, probablemente transmitida por el movimiento del globo, deberá ser uno de los elementos a mejorar. Existen soluciones diversas para incorporar elementos anti torcedura. Deberá estudiarse el más adecuado para una mayor estabilización de la imagen.
- En la línea del punto anterior, puede ser interesante contemplar la imagen mediante ralentización del vídeo. Una de las propuestas más efectivas consiste en incorporar cámaras deportivas de última generación que permitan grabación de vídeo HD a 120 fps. Esto consigue una cámara lenta de hasta el 20% si se edita el vídeo con una codificación y formato cinematográfico. El software de



estabilización digital que ofrecen las distintas aplicaciones informáticas resulta completamente inútil en movimientos tan violentos como el de un globo con rotaciones, cabeceos y desplazamientos laterales simultáneos.

- En las pruebas previas deberá comprobarse que la librería de lectura de datos del sensor de presión es la adecuada para que no realice el redondeo al número entero más próximo como se ha descrito en este trabajo.
- Los elementos estructurales como el habitáculo y la disposición interna de los elementos son completamente adecuados y es aconsejable construirlos como se describe en esta memoria. Su respuesta ha sido óptima.
- La duración de las baterías con las extensiones de capacidad son más que suficientes para un vuelo de estas características, permitiendo incluso intentar más altitud con el consiguiente aumento del tiempo de exposición al frío.
- Resulta del todo recomendable la utilización de dos GPS en oposición para minimizar la posibilidad de perder la señal y por tanto la ubicación del globo. Ya se ha relatado que sin el localizador de la tapa inferior la última señal habría sido la enviada a falta de 47s para el aterrizaje. Ello supone, dados los datos de la velocidad horizontal, peinar una zona de entre 100 y 150m de radio que, dependiendo de la orografía de la zona, puede resultar una tarea muy complicada.

Conclusiones derivadas de las imágenes grabadas

De las propias imágenes grabadas durante la realización del lanzamiento, es posible extraer algunas interesantes conclusiones. Para ello, es necesario entender los procesos que rigen la captación y el almacenamiento de las mismas y de qué manera se relacionan con los objetivos de nuestra experiencia.

Como recordaremos, uno de nuestros objetivos específicos era tratar de demostrar la esfericidad de la Tierra. Para ello, analizamos dos fotogramas extraídos de las imágenes de la grabación de vídeo. El primero muestra el horizonte terrestre con una ligera curvatura. Ciertamente es muy difícil ofrecer imágenes rotundas a esta altitud, si bien es verdad que a partir de los 18000m la curvatura comienza a ser apreciable. Es muy fácil sucumbir a la espectacularidad de las imágenes obtenidas por cualquier cámara provista de un objetivo gran angular porque acentúan la visión denominada “de ojo de pez”. Esto no es más que una aberración geométrica inherente a cualquier lente y que técnicamente consiste en que los puntos alejados del eje óptico presentan diferente aumento lateral. Cuanto menor sea la focal de la lente, más acentuado resulta el efecto. En teoría se puede corregir mediante un software especializado que suelen proporcionar los distintos fabricantes de cámaras. El problema es que los algoritmos que utilizan son diferentes según marcas y también conducen a resultados ligeramente diferentes. Por tanto, no hay seguridad de que la corrección sea completa en ningún caso.

La solución pasa por obtener una imagen en la que el horizonte se sitúe sobre el eje óptico (en este caso la línea horizontal que pasa por el centro geométrico de la imagen). Los puntos del eje óptico no sufren esta aberración y por tanto se puede admitir que es un horizonte sin distorsión (se ha obviado cualquier anexo relativo a las aberraciones ópticas).



La imagen va provista de una guía horizontal en color rojo para ver el grado de desvío respecto a una superficie plana.



Ilustración 89. Curvatura terrestre a los 20.000 metros

Para comparar con imágenes de la misma cámara a baja altitud se realizó el mismo tratamiento cuando el globo se elevaba solo unos cientos de metros.



Ilustración 90. Horizonte terrestre a baja altitud.

Aunque no pueda ser clasificado como resultado del experimento se incluye una imagen que muestra la bajísima difusión (scattering) de la luz en altitudes de más de 20000m debido al escaso número de moléculas de aire para provocar la dispersión del color de



menor longitud de onda (azul). El resultado es la aparición de un negro bastante profundo que se vuelve completamente dominante al llegar al espacio.



Ilustración 91. Indicios del color negro en el espacio exterior.

Conclusiones derivadas de los ensayos realizados

La realización de ensayos ha permitido obtener datos e información útil para verificar las hipótesis de trabajo de las que hemos partido en el proyecto. El equipo ha podido comprobar algunas de las premisas sobre las que se sustentaban los procedimientos.

En la relación que exponemos a continuación, se relacionan algunos de los datos y conclusiones extraídas durante las sesiones de prueba de los sistemas y equipos utilizados:

1. La presión del látex que conforma el globo resulta despreciable comparada con la exterior al nivel del mar, pues supone un incremento en la presión del helio tabulado en un 0,03%.
2. El globo inflado adopta forma de esferoide con un volumen real incrementado alrededor de un 7% respecto al volumen de la correspondiente esfera.
3. A la temperatura de $-47\text{ }^{\circ}\text{C}$ las cámaras graban con normalidad (disponiendo de sendos calentadores en las proximidades) y las baterías se mantienen con carga durante, al menos, dos horas.
4. Los sensores de presión y temperatura funcionan correctamente en el interior de cajas porosas y en condiciones próximas al vacío.
5. El dispositivo Spot Gen3 proporciona las señales de localización adecuadamente y a intervalos regulares de tiempo siempre que no se encuentre en situación de inmovilidad.
6. La realización de pruebas y ensayos previos a la ejecución de una investigación científica, resulta del máximo interés y aprovechamiento didáctico para los estudiantes involucrados, puesto que les permite la deducción de conclusiones



aplicables al experimento conductor y propio de la investigación objeto de su trabajo científico.

Conclusiones derivadas de la ejecución del lanzamiento

De igual forma, la jornada de lanzamiento con la que culminó la fase operativa del proyecto, deparó igualmente un gran número de conclusiones e ideas que condensamos en la siguiente relación:

1. La adecuada organización de las tareas previas a realizar y de los materiales a utilizar resulta uno de los elementos claves para asegurar el éxito del lanzamiento.
2. El adecuado registro de las tareas llevadas a cabo durante el lanzamiento, así como en los momentos previos y posteriores a éste, aporta datos importantes para la elaboración del informe o memoria correspondiente.
3. Las condiciones atmosféricas en el momento del lanzamiento provocan la ligera modificación de la masa de helio con la que llenar el globo y del radio de éste, con el objetivo de alcanzar la altura máxima estimada en los cálculos previos.
4. La adecuada disposición de todos los elementos en el interior de la caja portadora, así como el correcto sellado de ésta y la conveniente colocación de los dos dispositivos localizadores de la posición, concretamente en este caso las posiciones cenital y horizontal en la parte exterior de la caja, conducirán tanto a la localización de la caja después del estallido del globo como a la recuperación de los equipos de medida y de grabación de imágenes.
5. Podría haberse mejorado la estabilidad durante el vuelo de manera que hubiesen resultado imágenes también más estables.
6. La adecuada preparación y organización de todos los materiales y las tareas que deben preceder a una investigación científica, por parte de los estudiantes, redundan en una elevada probabilidad de éxito en la ejecución del experimento y, por tanto, de concluir la investigación con resultados de la mayor fiabilidad.



Conclusiones de enfoque educativo

La dimensión educativa y divulgativa del proyecto plantea importantes reflexiones y aporta una gran cantidad de información. La eficacia en la comunicación nunca ha de darse por sentada. En este caso, en el que se ha partido de un punto de indudable compromiso con la compartición del conocimiento y con el desarrollo de las inquietudes científicas y metodológicas, es obligado segregar las conclusiones educativas y someterlas a un análisis especial y separado.

En este apartado, se agrupan aquellas conclusiones que ha generado la participación de los alumnos como elementos fundamentales de la experiencia. Se han extraído a través del contacto mantenido durante los propios procesos del proyecto y a través de una encuesta de satisfacción realizada a la finalización de la misma.

Conveniencia de la promoción de valores cívicos

El propio discurso de la experiencia ha determinado la aparición de objetivos que no estaban previamente contemplados. A los principios metodológicos bajo el enfoque científico y a los educativos como el del trabajo cooperativo, se han añadido otros. Fundamentalmente la importancia de ciertos enfoques sociales que revierten directamente en la consecución de los resultados y objetivos perseguidos.

La particular conclusión de la experiencia de campo, con la determinante participación de elementos ajenos al proyecto, hizo patente el valor y la importancia de ciertos valores cívicos. De los muchos resultados posibles, algunos de ellos francamente indeseables, todos fueron descartados por la intervención de ciudadanos que por azar encontraron los equipos tras el aterrizaje. Su diligencia y respeto a la hora de contactar y facilitar la recuperación de los equipos, hacen patente la necesidad de promover entre los alumnos determinadas actitudes y valores:

- El **civismo**. Ciencia y sociedad están vinculadas por definición. La ciencia es el camino que la sociedad se ha dado a sí misma para encontrar el conocimiento. De ahí, por ejemplo, la incuestionable necesidad de la verificación de los resultados por elementos ajenos a las investigaciones y la necesaria compartición de los resultados con la sociedad para que éstos sean aprovechados por la misma. El civismo garantiza el respeto por el trabajo ajeno y su correcta valoración. Descarta actitudes como la usurpación de la autoría y la capitalización personal de los beneficios del conocimiento. En nuestro caso, no cabe sino celebrar la actitud de todos los participantes y, como hemos mencionado, la de otros imprevistos elementos que han participado.
- El **compromiso**. El ejercicio del trabajo cooperativo implica la asunción personal de las responsabilidades asignadas. Todo trabajo realizado en equipo, interconecta las tareas y condiciona grandemente los resultados al cumplimiento de los plazos y de las condiciones que se hayan convenido previamente. En nuestro caso, se ha podido solventar problemas y situaciones imprevistas merced al compromiso de los participantes que han alterado sus agendas personales para facilitar trabajos de campo, gestiones y contactos. Miembros del equipo, familiares y colaboradores



han demostrado un genuino y espontáneo compromiso que ha sido fundamental para llevar el proyecto a buen puerto.

Importancia de la participación e implicación práctica de los alumnos

Desde el comienzo de la experiencia y en el catálogo inicial de los principios que iban a inspirarla, estaba la plena participación de los alumnos. El motivo es doble:

- Por un lado, era previsible que durante la misma facilitara el acceso a una gran diversidad de conocimientos y competencias de muchas disciplinas, aplicables a prácticamente cualquier opción curricular. Se consideró interesante, además, que alumnos de una rama determinada tuviera una cierta aproximación a conceptos relativos a otras diferentes. La forma de realizar la transferencia del conocimiento, vinculada a la experiencia práctica, facilita en buena medida los procesos de aprendizaje. El feed-back obtenido de los alumnos confirma el balance positivo de la experiencia en este aspecto.
- Por otro, el trabajo cooperativo forma parte de la realidad en el mundo laboral y de la investigación. El proyecto proporciona una oportunidad al alumno de aproximarse al mismo, aportando de forma libre su trabajo, opinión o idea. Su participación no se ha limitado a ninguna etapa en particular y se ha promovido su iniciativa a la hora de afrontar las numerosas vicisitudes que han ido surgiendo.

Sin embargo, existen factores que han dificultado este proceso de integración. Se trata, fundamentalmente, de cuestiones relacionadas con la diversidad de agendas que tienen que sincronizarse en proyectos como éste. Conjuguar calendarios laborales, familiares y escolares entraña gran dificultad y quizá fuera posible para futuras experiencias explorar fórmulas que permitan alcanzar mayor grado de cooperación.

Consideraciones sobre la dimensión educativa del proyecto

Proyecto Yuri no es un proyecto de investigación dirigida como tal. El término investigación se asocia a cualquier actividad destinada a contestar preguntas mediante el diseño y la realización de experimentos. En estos casos el profesor va proporcionando al alumno los elementos necesarios para su avance. A propuesta directa del profesor o a requerimiento del propio alumno. Sin embargo, en este trabajo existía una hoja de ruta previa bien definida y el peso del avance no ha recaído sobre el alumno. En realidad, el formato ha sido más parecido a un campus de avance y ampliación donde el alumno, a pesar de manejar o manipular ciertos elementos, es instruido. A esta situación han contribuido varios factores:

- El nivel curricular de los alumnos de 4º de ESO no era suficiente para afrontar muchas de las cuestiones que formalmente se planteaban. Por tanto, el desarrollo teórico de la dinámica del movimiento del globo descansaba sobre el equipo científico/docente en su calidad de instructores. De igual modo, la electrónica de la experiencia requería de conocimientos de programación y ensamblaje de circuitos impresos que se transmitieron solo parcialmente a los alumnos.



- La experiencia de lanzar, grabar y recuperar un globo se ha realizado en muchas ocasiones y está muy bien documentada con lo cual las cuestiones que se podían plantear como investigación del alumnado quedan más limitadas.
- Muchos de los permisos de navegación, manipulación, venta o transporte de materiales están reservados a personas mayores de edad e incluso a profesionales de algunas de esas ramas. Esto hacía imposible encargar al alumno las cuestiones logísticas y de infraestructura.

Valores añadidos de índole educativa

Para finalizar este capítulo, incluiremos algunas reflexiones que nos parece que apuntan a la particular forma de enfocar el proyecto. De esta manera, tratamos de enfatizar algunas conclusiones que, sin formar necesariamente parte de las perseguidas inicialmente, han ido perfilándose como fundamentales y que han caracterizado el resultado. Quizá, representan lo que pueda haber de especial en este proyecto.

Sin ninguna duda el mayor aporte para el alumno es haber participado de todas las actividades de este proyecto, algunas de modo protagonista. Conocer de cerca ámbitos muy concretos de la Tecnología o ciertos sectores profesionales le proporciona una visión cercana, práctica y necesaria de la Ciencia en la sociedad. Las investigaciones interdisciplinarias aportan siempre un gusto y sensibilidad por la Ciencia que permanece más allá de la finalización del proyecto.

A pesar de que técnicamente el proyecto es un trabajo fundamentalmente físico/meteorológico, hay un valor añadido que es la realización del documental *Proyecto Yuri*. Este es el eslabón que mejor puede conectar con un sector más amplio de la sociedad. Todo él, está impregnado de una actitud de respeto al medio ambiente y a la vida y de concienciación sobre la fragilidad de nuestro medio natural. La Ciencia aparece a lo largo de sus 47 min como el medio para lograr dar respuesta a muchos de nuestros problemas como especie, para concluir con un mensaje decidido en contra del “terraplanismo”. Sin duda, un banderín de enganche para fomentar en los alumnos y en cualquiera que pueda contemplar el vídeo el pensamiento crítico y racional como única forma de acabar con la superstición y los prejuicios. Como proponía Carl Sagan, *la Ciencia como vela en la oscuridad*.



BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES CONSULTADOS

- Aemet. 2019.** Arcimís. *Archivo Climatológico y Meteorológico Institucional*. [En línea] Agencia Estatal de Meteorología, 2019. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/407>.
- . **2019.** *Base de Datos Climatológicos*. [Base de datos] Madrid : Agencia Estatal de Meteorología, 2019.
- . **2018.** <http://www.aemet.es/es/portada>. [En línea] Agencia Estatal de Meteorología, 2018.
- . **2018.** *Meteoglosario Visual. Diccionario ilustrado de Meteorología*. [En línea] Agencia Estatal de Meteorología, 2018.
- . **2018.** *Valores Climatológicos Normales*. [En línea] Agencia Estatal de Meteorología., 2018. <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>.
- Arduino. 2018.** *Arduino uno REV3*. [En línea] 2018. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
- . **2018.** *TruStability HSC and SSC Series Pressure Sensors (Digital Output)*. [En línea] 2018. <https://playground.arduino.cc/Main/HoneywellTruStabilitySSC-HSCPressureSensors/>.
- 2018.** *arduino-ssc*. [En línea] Google code, 2018. <https://code.google.com/archive/p/arduino-ssc/>.
- 2018.** *Balloon Performance Calculator*. [En línea] High Altitude Science, 2018. <http://tools.highaltitudescience.com/>.
- Bisbal, IES. 2008.** *Meteotek08: Sonda meteorológica*. Girona : s.n., 2008.
- BOLE, A. et alt. 2001.** *The navigation control manual*. Oxford : Newnes (Butterworth-Heinemann), 2001.
- BOWDITCH, N. 2002.** *American practical navigator. An epitome of navigation*. Bethesda : Defense Mapping Agency Hydrographic/Topographic Center, 2002.
- Chapman, M. 2012.** *Weather Balloon Physics*. [En línea] zmatt, 2012. <http://zmatt.net/weather-balloon-physics/>.
- Digi-key. 2018.** *Sensors-Transducers*. [En línea] 2018. <https://www.digikey.com/products/en/sensors-transducers/25>.
- ECMWF. 2018.** <https://www.ecmwf.int/>. [En línea] European Centre for Medium-Range Weather Forecast, 2018.
- EuroWeather. 2018.** <http://www.eurometeo.com/english/maps>. [En línea] EuroWeather, 2018.
- Extremadura, Junta de. 2017.** *IES Vegas Bajas. Lanzamiento del globo sonda "VegaSky-2"*. [En línea] Junta de Extremadura, 11 de Noviembre de 2017. <https://iesvegasbajas.juntaextremadura.net/index.php/noticias/11-general/923-lanzamiento-del-globo-sonda-vegasky-2-2017>.
- FEGA. 2018.** *Sistema de Información Geográfica para la Política Agraria Común*. [En línea] Fondo Español de Garantía Agraria, 2018. https://www.fega.es/es/PwfGcp/es/ayudas_dir_desa_rural/aplicacion_sigpac/index.jsp.



forecastmaps.eu. 2018. <http://www.forecastmaps.eu/>. [En línea] Laboratory of Meteorology, Department of Physics, University of Ioannina , 2018.

Gobierno de Cantabria. 2018. Visualizador de Información Geográfica. [En línea] Consejería de Universidades e Investigación, Medio Ambiente y Política Social, 2018. <http://mapas.cantabria.es/>.

Habhub.org. 2018. Balloon Burst Calculator. [En línea] Cambridge University, 2018. <http://habhub.org/calc/>.

HALTINER, G. et alt. 1957. *Meteorología Dinámica y Física*. Nueva York : Instituto Nacional de Meteorología, 1957.

Insignia. 2018. Insignia. [En línea] Enaire, 2018. <https://ais.enaire.es/insignia/>.

ISO. 2007. International Standar Atmosphere. ISO 2533:1975/Add 2:1997. [En línea] International Organization for Standardization, 2007. <https://www.iso.org/standard/7472.html>.

Modelling the ascent of sounding balloons: derivation of the vertical air motion. **Gallice, A. et alt. 2011.** s.l. : Atmospheric Measurement Techniques, 2011, Vols. 4, 10 (2235-2253).

MODIS. 2018. <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>. [En línea] NASA, 2018.

MOREU CORBERA, N. et alt. 1979. *Astronomía y Navegación*. Madrid : Hijos de E. Minuesa, 1979.

NASA. 2019. Drag of a Sphere. [En línea] 2019. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html>.

Nearspace. 2011. Descubriendo la Frontera del Espacio . *Exploración de la Estratosfera*. [En línea] 2011.

NOAA. 2018. Global Forecast System. [En línea] National Centers for Environmental Information, 2018. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>.

—. **2018.** Model Catalog. [En línea] National Centers for Environmental Information, 2018. <https://www.ncei.noaa.gov/thredds/model/model.html>.

Notes on Meteorological Balloon Mission Planning. **Sóbestor, A. et alt. 2013.** Daytona Beach : American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.

OMM. 2018. <https://public.wmo.int/es>. *Organización Meteorológica Mundial*. [En línea] OMM, 2018.

On the inflation of a rubber balloon. **Vandermarliere, J. 2016.** 9 (566-567), s.l. : The Physics Teacher (American Institute of Physics), 2016, Vol. 54.

On the rise and fall of a ball with lineal or quadratic drag. **Timmermann, P. et alt. 1999.** 538, s.l. : American Journal of Physics, 1999, Vol. 67.

PETTERSEN, S. 1976. *Introducción a la Meteorología*. Madrid : Espasa Calpe S.A., 1976.

Skyvector. 2018. <https://skyvector.com/>. [En línea] ie Business School, 2018.

Smith, C. 2010. Mechanism of Drag Reduction by Dimples on a Sphere. [En línea] 2010. <https://research.engineering.ucdavis.edu/biosport/wp-content/uploads/sites/24/2014/06/Golf-Ball-Presentation.pdf>.



Sparkfun. 2018. Sparkfun microSD Shield. [En línea] 2018.
<https://www.sparkfun.com/products/12761>.

Universidad de Cambridge, Landing Predictor. 2018. <http://predict.habhub.org/>. [En línea] Universidad de Cambridge, 2018.

Vary, A. 2017. Calculando la Curvatura. [En línea] 29 de Marzo de 2017.
<https://refutandoes.wordpress.com/2017/03/29/calculando-la-curvatura/>.

weather.us. 2018. <https://weather.us/satellite/europe-africa/satellite-visible-archive.html>. [En línea] WeatherOK Inc., 2018.

Weatheronline. 2018. <https://www.weatheronline.co.uk/>. [En línea] WeatherOnline Ltd. - Meteorological Services, 2018.

Zygrib. 2018. <http://www.zygrib.org/>. [En línea] Jacques Zaninetti, 2018.