

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

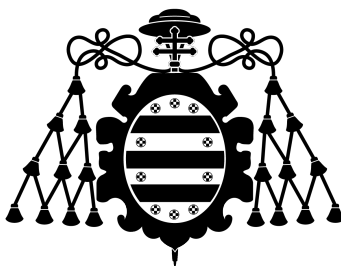
TRABAJO DE FIN DE GRADO

CARMAFLY:
**Proyecto de construcción de un globo
sonda para la obtención y análisis de un
sondeo vertical atmosférico.**

Autor:
Manuel VIDAL SUÁREZ

Tutores:
Joaquín GONZÁLEZ-NUEVO
GONZÁLEZ
Laura BONAVERA

11 de julio de 2022



Universidad de Oviedo

*Los barcos están a salvo en el puerto,
pero no es para eso que se construyen los barcos.*

Agradecimientos.

A mi madre Carmen y mi hermana María, por tantas cosas que ni puedo escribir, pero sobre todo por creer en mi hasta cuando ni yo creo.

A mi abuelo por ser una inspiración y al resto de mi familia que no duda en apoyarme.

A Víctor, compañero de lo que seguramente haya sido la etapa más relevante de mi vida y que resulta imposible explicar sin él.

A Yoli, sinónimo de compañerismo y amistad.

A Falo, culpable de plantar, en lo que aquel momento era un desierto, la semilla de la ciencia, la cual parece haber florecido.

A Abe, por alumbrar el camino cuando más oscuro estaba, una persona inspiradora que me enseñó mucho más que a resolver problemas.

A los principales colaboradores de este proyecto. AEMET, con especial reconocimiento a Carlos Fernández Freire y a ESTELA, con Ivan Bustelo, cuyo papel de colaborador se empaña con el de amigo.

A mis tutores, por el respeto mostrado a mis tiempos a la hora de desarrollar este proyecto.

A Roberto Manín, que me hizo llevar el stand de “Física con globos” demasiado lejos.

Y a muchos otros que me dejo, pero intento explicarles en el día a día la importancia que tienen en mi desarrollo cómo persona.

Índice

1. La atmósfera terrestre.	1
1.1. Origen y evolución de la atmósfera terrestre.	1
1.1.1. Creación del universo, el sistema solar y la Tierra.	1
1.1.2. Geocronología terrestre.	3
1.2. Composición de la atmósfera terrestre.	7
1.3. Estructura de la atmósfera terrestre.	9
1.3.1. Variación de la presión de aire en función de la altura.	11
1.3.2. Variación de la densidad con la altura.	12
1.4. Estabilidad atmosférica y procesos adiabáticos.	14
1.5. Sondeos meteorológicos.	16
1.6. Predicción meteorológica.[17]	17
1.6.1. Tefigramas.	17
1.6.2. Diagrama oblicuo.	25
2. Construcción de la sonda.	26
2.1. Electrónica.	26
2.2. Cámaras	32
2.3. Caja aislante.	34
2.4. Globo y paracaídas.	37
2.5. Helio.	39
2.6. Localizador GPS.	41
2.7. Pruebas y simuladores.	44
2.7.1. Prueba de estrés a bajas temperaturas.	44
2.7.2. Prueba de apertura del paracaídas.	51
2.7.3. Prueba de localización.	52
2.8. Permisos necesarios para el lanzamiento.	53
3. Lanzamiento de Carmafly.	54
3.1. Estudio del lugar de lanzamiento.	54
3.2. Selección del día de lanzamiento.	57
3.2.1. Uso de los simuladores.	57
3.3. Proceso de lanzamiento.	60
3.4. Recuperación del equipo.	64
4. Conclusiones.	67
5. Bibliografía	68

1. La atmósfera terrestre.

1.1. Origen y evolución de la atmósfera terrestre.

1.1.1. Creación del universo, el sistema solar y la Tierra.

El universo nace, aproximadamente, hace 13.700 millones de años con el evento conocido como *Big Bang*.

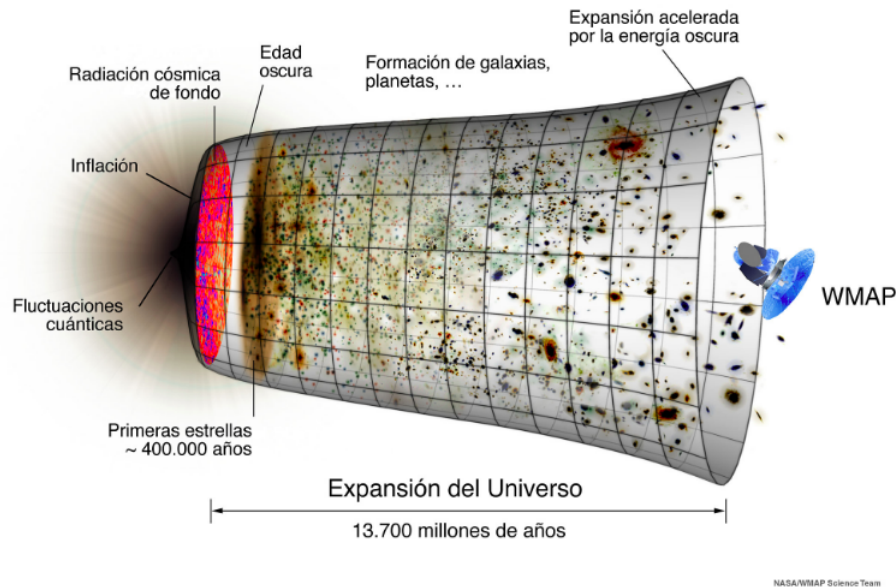


Figura 1: Esquema de la creación y evolución del universo.[5]

La cosmología moderna afirma según el principio cosmológico que el universo, a escalas suficientemente grandes, es homogéneo e isótropo. La isotropía significa que veremos las mismas propiedades sin importar la dirección en la que observemos y la homogeneidad, que todos los puntos del universo lucen igual y tienen las mismas propiedades.

Formado principalmente por hidrógeno y helio, el universo presenta diferentes estructuras que se mencionan a continuación de forma jerárquicamente ascendente:

- **Estructuras menores:** Planetas, estrellas y pequeñas agrupaciones como el sistema solar.
- **Galaxias:** Agrupaciones de estructuras menores.
- **Cúmulos de galaxias:** Conjuntos de galaxias cuyo diámetro alcanza varios millones de años luz.
- **Supercúmulos de galaxias:** Conjuntos de cúmulos de galaxias que miden cientos de millones de años luz.

La Figura 1 muestra la evolución del universo desde el momento que se produce el Big Bang hasta hoy. En los primeros minutos de este evento, la temperatura se redujo lo bastante para producirse la nucleosíntesis principal, donde se sintetizaron hidrógeno, helio y cantidades muy pequeñas de litio y berilio, a partir de protones y neutrones.

Tras sintetizarse estos elementos la atracción gravitatoria fue la encargada de agruparlos en inmensas nubes, las primitivas galaxias. Mientras estas se expandían, las nubes de hidrógeno y helio de su interior se iban comprimiendo por efecto de la gravedad hasta encenderse las primeras estrellas, la primera generación estelar. En estos astros se comenzarían a sintetizar toda la riqueza de elementos químicos a día de hoy existentes, gracias a las reacciones de fusión nuclear entre hidrógeno y helio, y se agruparían a su alrededor estructuras menores que desembocarían en la creación de sistemas planetarios tales como, el sistema solar.[5]

El proceso de creación del sistema solar lo podemos dividir en 5 etapas:

1. El punto de partida, es la existencia de una nebulosa de gas y polvo. Esta nube venía ya enriquecida por elementos producidos por otras estrellas y supernovas que fueron expulsados al espacio. Los principales compuestos presentes en este polvo eran CO_2 , CH_4 y NH_3 .

2. Una de las teorías más aceptada explica que la nebulosa se activa, hace aproximadamente 4.6 Gyr, debido a la energía proporcionada por ondas de choque de una supernova vecina. Gracias a este aporte de energía la materia difusa se agrupa formándose una protonebulosa. Otra vez por atracción gravitacional, gas y polvo presentes en la protonebulosa se concentran en un globo dotado con rotación. Esta rotación, producida por el colapso gravitacional, genera su fuerza centrífuga asociada, como es sabido por el principio de conservación del momento angular, a su vez esta dispersa el material del sistema protosolar formado hacia el ecuador del astro. Se forma así un disco del que se separarán los anillos que posteriormente darán lugar a los planetas que conocemos a día de hoy.

3. Esta materia presente en el disco que bordeaba al ecuador de la estrella, se fue agrupando en diferentes cuerpos, formando protoplanetas cada uno en su correspondiente anillo alrededor de la protoestrella. Los restos de materia que no fueron capaces de adherirse a uno de estos protoplanetas se conocen como asteroides. El impacto continuo, durante la primera etapa de la Tierra, de estos asteroides, cargados de compuestos orgánicos complejos y grandes cantidades de agua, aportaron condiciones indispensables para el origen de la vida.

4. Debido a la atracción gravitatoria la materia implosionó hacia el núcleo de la estrella, produciéndose un aumento de la presión que logró vencer la fuerza de repulsión entre los núcleos de hidrógeno, se habían producido átomos de helio mediante fusión nuclear. La presión de radiación de la energía desprendida equilibra la fuerza de la gravedad estabilizando la estrella. Se puede considerar que se ha creado o encendido la estrella.

5. El papel de Júpiter como escudo de meteoritos, debido a su gran atracción gravitacional, es algo que se debe mencionar en el proceso de explicar la Tierra tal y cómo la conocemos. Aún así, un planetoides del tamaño de Marte chocó contra la Tierra hace 4.45 Gyr, provocando un desprendimiento de sí misma que se convertiría en la Luna.

Este cúmulo de eventos concretó en la creación del Sistema Solar, integrado entre otros planetas por la Tierra, la cuál ha experimentado cambios muy significativos durante su evolución. [1]

1.1.2. Geocronología terrestre.

Es importante profundizar en la historia de la Tierra y sus diferentes etapas, para así poder comprender cómo se dieron ciertas características atmosféricas que más adelante estudiaremos. Estas etapas en las que podemos dividir la historia terrestre se llaman eones. Son una de las mayores divisiones de tiempo de la historia de la Tierra utilizadas en la escala temporal geológica, siendo la categoría de rango superior a las eras e inferior a los supereones.

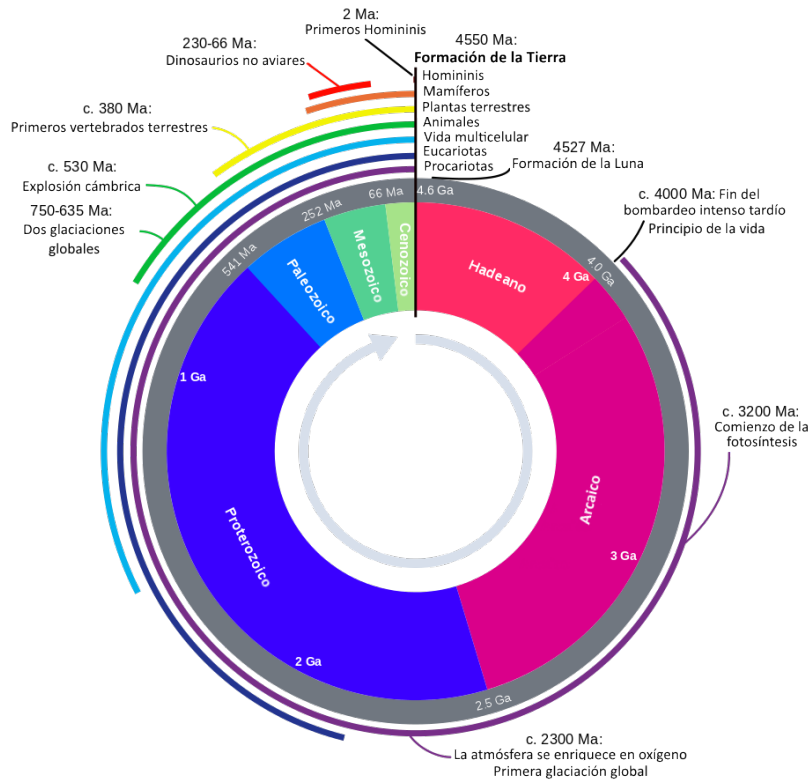


Figura 2: Escala temporal geológica.[3]

Pese a que en 1957 se intentó definir un eón como una unidad de tiempo exacta de mil millones de años, la idea no fue aceptada, respondiendo la duración de estos a ciertos acontecimientos geológicos y biológicos bien acontecidos. En la actualidad dividimos la historia de la Tierra en cuatro eones mencionados a continuación:

- **Eón Hadaico.**

Este eón, cuyo nombre deriva de Hades, dios de los infiernos, dura desde hace 4.54Gyr con la creación de la Tierra, hasta hace 3.8 Gyr con “el último gran bombardeo”.

El primer evento a mencionar es la llamada catástrofe del hierro, donde metales como hierro y níquel se congregaron en el núcleo en un tiempo geológicamente breve.

Por aquel momento, la Tierra, era una acumulación de masa relativamente uniforme cuya temperatura fue aumentando, no solo por el calor residual de la colisión, sino también por la presencia de materiales radioactivos. En este entorno las temperaturas alcanzadas fueron de $1.538\text{ }^{\circ}\text{C}$, un contexto en el que los materiales fundidos y rocosos se movían rápidamente, permitiendo que hierro y níquel, materiales densos que se encontraban distribuidos por toda la masa, comenzaran su migración al centro de la Tierra para formar el primer núcleo en un proceso conocido como diferenciación planetaria.

Esta gran masa metálica dotada de rotación crea un campo magnético, conocido como la magnetosfera, que protege tanto a la Tierra como a la atmósfera del peligroso viento solar y la radiación. No ocurre esto en Marte, ya que al enfriarse mucho más rápido no cuenta con magnetosfera y por tanto los vientos solares tienen un gran impacto en este planeta.

Mencionar que la palabra catástrofe para referirse a este evento adquiere el significado de “gran cambio repentino” ya que para nada fue un una “desgracia” sino un evento indispensable para la vida humana.

El siguiente hecho de relevancia es el origen de la Luna (4.48Gyr), como ya se mencionó la teoría más compartida es la del gran impacto, que explica la formación del satélite tras el choque de la Tierra con un protoplaneta del tamaño de Marte llamado Tea.

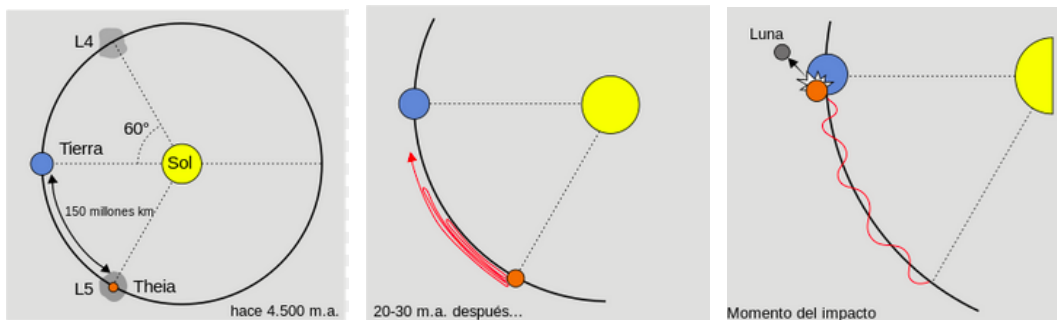


Figura 3: Esquema de la teoría del gran impacto. [7]

El papel de la luna como satélite protector ante el impacto de meteoritos es muy importante para la vida.

En ese momento el panorama terrestre era el de un planeta rocoso, estéril y sin atmósfera, esta se empieza a formar gracias al aumento de la actividad volcánica, producida por el enfriamiento de la superficie (causante del aumento de convección en el magma interior) y los frecuentes impactos de meteoritos. Los gases liberados y causantes de esta primera atmósfera existían en proporciones de: 70 % de vapor de agua, 15 % de CO_2 , 5 % de N_2 y 5 % de H_2S . Además de porciones pequeñas de otros gases como CO , CH_4 , NH_3 , H pero no O_2 .

Con el enfriamiento de la corteza, el vapor de agua existente en la atmósfera se condensó, provocando las primeras nubes y posteriormente lluvias, que duraron miles de años. Inicialmente estas gotas no llegaban a tocar el suelo, ya que se evaporaban antes de hacerlo a causa

de las altas temperaturas, pero debido a esta evaporación el enfriamiento siguió aumentando llegando a formarse los primeros océanos.

El último gran hecho de relevancia de este periodo es el conocido como bombardeo intenso tardío, que tuvo lugar en torno a hace 4,1-3,8 Gyr. Durante este periodo se produce un gran bombardeo de asteroides y cometas, causantes por ejemplo de los cráteres de la Luna y que probablemente aportaran a la Tierra aminoácidos. Fueron también causantes de una destrucción parcial de la corteza.

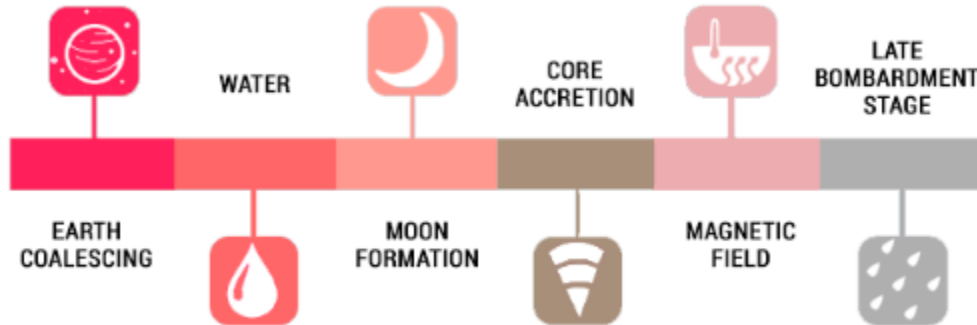


Figura 4: Línea temporal del eón Hadeico.[3]

■ Eón arcaico.

Hace 4 Gyr la Luna, que ya se había formado, comienza a tener efectos secundarios sobre la Tierra. La ralentización de la rotación terrestre, de 6 a 24 horas; la estabilidad de la nutación y la inclinación del eje de rotación, causante de las estaciones, son efectos producidos por nuestro satélite y de vital importancia para el desarrollo de la vida. Esta vida se estima que aparece hace 3.8 Gyr, gracias a los aminoácidos llegados a través de meteoritos y las condiciones dadas en los océanos, surgen las primeras células procariotas anaeróbicas. Algunas de ellas comienzan a realizar la fotosíntesis anixogénica primitiva, en la que aún no producen oxígeno.

600 millones de años después aparecen las Cyanobacterias, que son las primeras en realizar la fotosíntesis oxigénica. Estas bacterias no tienen depredadores y comienzan a producir cantidades muy grandes de oxígeno destinado a la oxidación del hierro y metales en agua. Una vez oxigenado el hierro se va hacia el fondo de los océanos, no habiendo nada que detenga esta *gran oxigenación* (2.5 Gyr). El resto de formas de vida distintas a las cyanobacterias murieron en esta etapa, la catástrofe del oxígeno, al ser este tóxico para ellas.

Otro evento indispensable para entender la atmósfera actual es la formación de la capa de ozono en esa época. La gran cantidad de oxígeno presente, reacciona con los rayos ultravioletas produciendo ozono y formando esta capa, que detiene los propios rayos ultravioleta brindando la protección necesaria para el desarrollo de la vida.

■ Eón proterozoico.

Gracias a la capa de ozono la vida en zonas cercanas a la superficie del agua deja de ser tan peligrosa y los seres vivos comienzan a colonizar las partes altas del océano.

En ese momento, hace 2,2Gyr, el sol todavía joven, se está asentando como estrella y en continuo calentamiento. Esta radiación produce que la gran cantidad de oxígeno presente en la atmósfera se combine con el metano dando CO_2 , mucho menos efectivo como gas invernadero que el metano consumido en la reacción. Este enfriamiento a nivel planetario se resume en la 1ª glaciación global, pese a la cual el desarrollo de la vida no se detuvo.

La propiedad del hielo de ser menos denso que el agua propició que no se congelaran todos los océanos y siguiese existiendo agua líquida en las grandes profundidades. En ese entorno se desarrollan las primeras células eucariotas (2 Gyr) las cuáles, a través de endosymbiosis, se diferencian entre plantas y animales dando lugar a organismos multicelulares hace 1.5 GYr.

Es importante tener en cuenta que el estado de equilibrio de la Tierra es el de glaciación, y son los gases de efecto invernadero los que nos alejan de este. La creación del supercontinente Rodinia en esta época y posteriores, ocasionan lluvias durante miles de años que, no solo reducirían el vapor de agua, si no que también captarían CO_2 . Este ciclo se retroalimenta reduciendo el efecto invernadero y produce cuatro glaciaciones globales más entre 0,8-0,5 Gyr.

El suceso con el que podemos poner fin a esta etapa es la estabilización de la capa de ozono, con todas las consecuencias positivas que esto tiene para la vida.

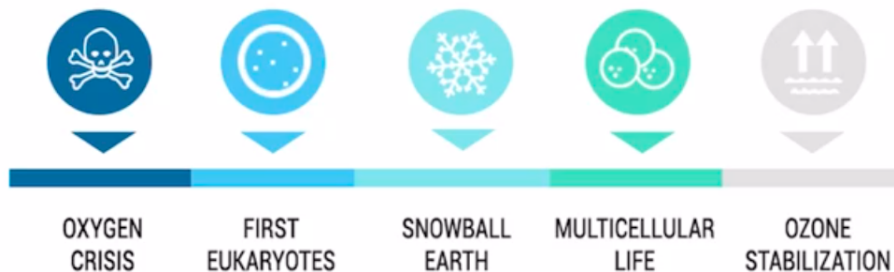


Figura 5: Línea temporal del eón proterozoico.[3]

■ Eón fanerozoico.

Es la etapa que va desde hace 500 millones de años hasta la actualidad, en la que se produce la explosión de la vida. Sin embargo no debemos pensar que se trata de un periodo de tiempo exento de grandes cambios climáticos, ya que sucesos como el impacto de meteoritos o los supercontinentes en movimiento fueron desencadenantes de estos.

Es importante tener en cuenta también la relevancia que los seres vivos tienen en la atmósfera. Las plantas al no tener un depredador que impidiese su expansión por la superficie terrestre produjeron una captación masiva de CO_2 y en consiguiente otra glaciación, al reducirse el efecto invernadero. [1] [2][3] [6]

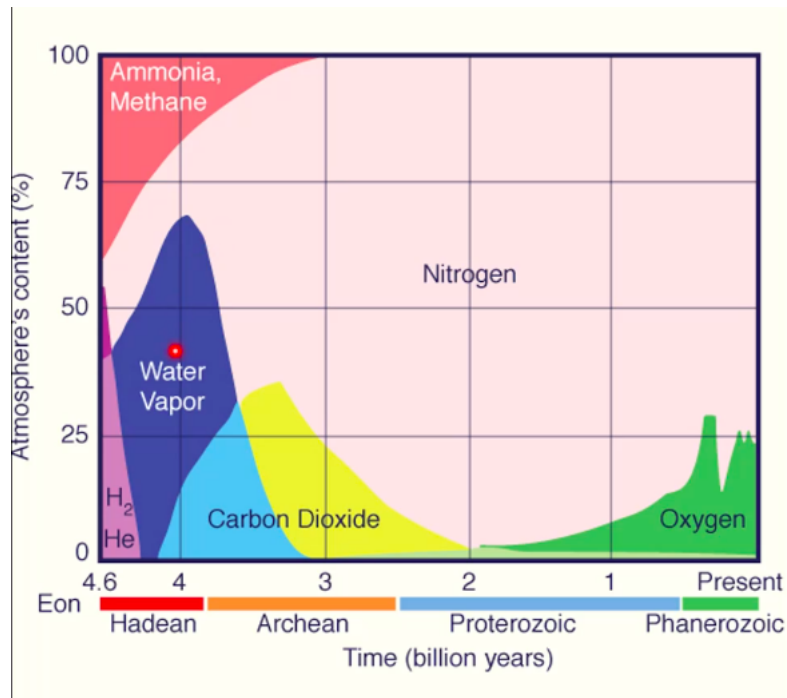


Figura 6: Evolución química de la atmósfera.[3]

1.2. Composición de la atmósfera terrestre.

Los grandes eventos que han tenido lugar a lo largo de la historia terrestre han ido variando la composición de la atmósfera como se observa en la figura 6. Este esquema de la evolución química plasma los eventos mencionados en el apartado anterior. Podemos ver un aumento del vapor de agua durante el eón hadeico, debido a las lluvias derivadas del enfriamiento de la corteza terrestre. Se alcanza un máximo de vapor de agua antes de entrar en el eón arcaico. El aumento del dióxido de carbono se explica con la gran oxigenación mencionada, pues inicialmente este oxígeno se empleó en oxidar el metano atmosférico y el hierro. Posteriormente acabó con la vida de aquellas especies para las que era tóxico y en su evolución podemos ver reflejadas las diferentes glaciaciones.

A la hora de hablar de la composición actual de la atmósfera terrestre podemos diferenciar dos zonas, la homosfera y la heterosfera. En la homosfera (0-100km) los vientos mezclan los gases en una masa más o menos homogénea con una distribución de estos mostrada en la Tabla 1, donde ppmv representa partes por millón de volumen.

Se refleja que el 78% del volumen de aire está formado por Nitrógeno, seguido con un 21% de oxígeno como segundo elemento más abundante. El argón contribuye en un 0,93% al aire, siendo un gas noble que no reacciona con ninguna sustancia. Siguiendo el orden descendente de proporción encontramos el dióxido de carbono, el cual es un gas de proporción variable al participar en procesos biológicos y climatológicos muy importantes. Tanto el dióxido de carbono como el vapor de agua y el metano, cuyas proporciones son también variables, son gases de efecto invernadero.

Gas	ppmv
Nitrógeno	780.840
Oxígeno	209.460
Argón	9.340
Dióxido de carbono	400
Neón	18,18
Helio	5,24
Metano	1,79
Kriptón	1,14
Hidrógeno	0,55
Óxido nitroso	0,3
Xenón	0,09
Ozono	0,0-0,07
Dióxido de nitrógeno	0,02
Yodo	0,01

Cuadro 1: Composición homosfera (aire seco)[9]

La heterosfera es la porción de la atmósfera por encima de esta, en este punto los gases se encuentran estratificados, debido a la relativa poca frecuencia de colisiones moleculares, como se ve en la Figura 2. [3] [8] [9]

km	Capa de:
80-400	Nitrógeno molecular
400-1100	Oxígeno atómico
1100-3500	Helio
3500-10000	Hidrógeno

Cuadro 2: Composición heterosfera.[9]

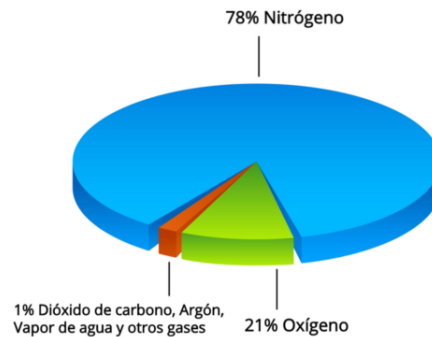


Figura 7: Composición de la atmósfera.[10]

1.3. Estructura de la atmósfera terrestre.

Para el estudio de la estructura atmosférica debemos tener en cuenta tres parámetros principales, presión, densidad atmosférica y temperatura. Los dos primeros disminuyen generalmente de forma continua con la altitud, sin embargo el perfil de temperatura es más complicado y define las diferentes capas en las que estructuramos la atmósfera. Es por eso que en este apartado nos centraremos en el perfil vertical de temperatura y hablaremos posteriormente de como varían densidad y presión.

Podemos ver el perfil vertical de temperatura en la Figura 8 y en consecuencia las cinco capas en las que se divide la atmósfera. En orden ascendente, estas capas son la troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera.

■ Troposfera.

Esta capa se extiende desde la superficie hasta unos 10 km de altura, aunque dicho límite varía con la latitud y estación del año. Puede llegar a alcanzar los 20 km en el ecuador y los 7 km en los polos durante el invierno.

La mayoría de los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en la atmósfera se dan en esta capa: lluvias, vientos, cambios de temperatura... debidos a la abundancia relativa de agua.

Como vemos en la Figura 8 en esta capa, la temperatura desciende progresivamente con la altura hasta unos -60°C , se alcanza entonces la conocida tropopausa donde la temperatura es constante. Esta zona intermedia entre troposfera y estratosfera es ideal para el vuelo de aviones debido al reducido número de nubes y movimiento de aire.

■ Estratosfera.

Esta capa que sigue a la troposfera tienen un espesor aproximado de unos 40 km.

Esta capa presenta estratificación colocándose las capas calientes encima de las frías. Una de ellas entre los 15km y los 35km es la capa de ozono, protagonista en el aumento de la temperatura con la altura. El ozono absorbe la radiación ultravioleta produciendo reacciones exotérmicas.

Aunque más tarde hablaremos de la presión es importante mencionar que la parte superior de esta capa limita la altitud operacional de los globos aerostáticos y los aviones jets, siendo una milésima parte de la presión de la superficie.

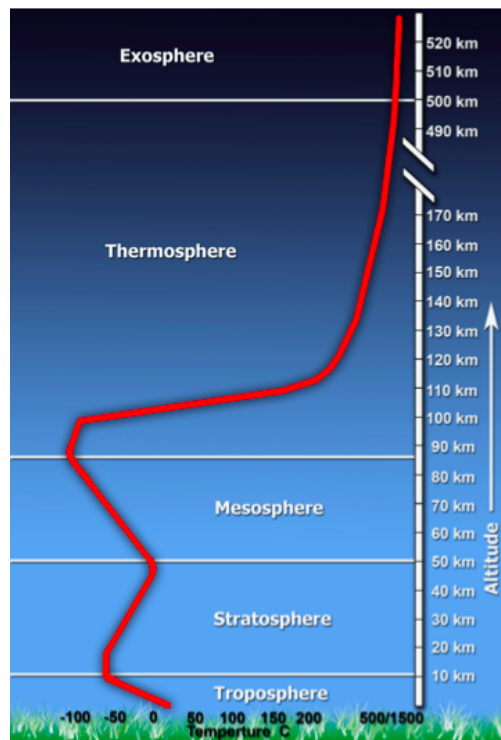


Figura 8: Perfil vertical de la temperatura.[3]

- **Mesosfera.** En esta capa, la temperatura vuelve a disminuir a medida que ascendemos hasta llegar a un mínimo de -90°C . Esta capa se extiende entre los 50km y los 85km, en una zona que dificulta su estudio más de lo que podríamos pensar, ya que se encuentra en un punto muy alto para los globos y muy bajo para los satélites. Aún sí sabemos que la mayoría de los meteoritos se destruyen en esta capa presentando esta gran concentración de hierro y otros metales.
- **Termosfera.** Esta capa se extiende desde los 85 km hasta aproximadamente los 500 km aunque la densidad y presión son tan bajas que a partir de los 100 km se considera espacio abierto.

La temperatura aumenta rápidamente hasta estabilizarse debido al bombardeo de nitrógeno y oxígeno moleculares y de especies atómicas por partículas energéticas, como los electrones y protones, provenientes del Sol. Se alcanzan así temperaturas de $500\text{-}2000^{\circ}\text{C}$ en la parte superior.

- **Exosfera.** Más allá de la termosfera definimos la exosfera, que se extiende hasta el límite con el espacio exterior a 9600km de altura. Está constituida principalmente por partículas que pierde la atmósfera terrestre.

[3] [11]

1.3.1. Variación de la presión de aire en función de la altura.

Tras entender la variación de la temperatura con la altura, estudiaremos a continuación como le afecta a la presión esta variación.

Comenzaremos con el estudio de una atmósfera isoterma, entendiendo por esto aquella atmósfera cuya temperatura es igual en todos sus puntos. Para ello partiremos de ecuación fundamental de la hidrostática que gobierna el movimiento de cualquier cuerpo sobre un fluido,

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

Siendo P la presión absoluta, ρ la densidad del fluido, g la aceleración de la gravedad y h la altura dentro del fluido.

Asumiendo que la atmósfera se comporta como un gas ideal,

$$PV = nRT = \frac{m}{M}RT \Rightarrow P = \frac{m}{V} \frac{RT}{M} = \frac{\rho}{M}RT \quad (2)$$

donde M se refiere a la masa molar del gas, R a la constante de los gases ideales y T a la temperatura absoluta. Tomando como origen de altura la superficie de la tierra y diferenciando 1 obtenemos:

$$dP = -\rho g dh \quad (3)$$

que combinada con 2 nos da:

$$\frac{dP}{P} = -\frac{gM}{RT} dh \quad (4)$$

Asumiendo T constante (atmósfera isoterma) e integrando de la siguiente manera,

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = -\frac{gM}{RT} \int_0^h dh \quad (5)$$

obtendremos la expresión que representa la variación de la presión con la altura considerando P_0 como la presión en un punto inicial:

$$P = P_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}} \quad (6)$$

Si en cambio consideramos una atmósfera con variación de temperatura lineal:

$$T = T_0 - Lh \quad (7)$$

donde T_0 será la temperatura inicial en un cierto punto y L la tasa de enfriamiento establecida generalmente en en 0,0065 K/m.

Transformando 4 según esto obtenemos:

$$\frac{dP}{P} = \frac{gM}{R(Lh - T_0)} dh \quad (8)$$

Consecuentemente tras un cambio de variable en la ecuación 5 tal que, $Lh - T_0 = u$ e integraremos entre $h=0$ y $h=H$.

$$\int_{P_0}^P \frac{dP}{P} = \frac{gM}{RL} \int_{-T_0}^{LH-T_0} \frac{du}{u} \quad (9)$$

Resolviendo esto llegaremos a:

$$P = P_0 \left(1 - \frac{Lh}{T_0} \right)^{\frac{gM}{RL}} \quad (10)$$

Esta aproximación es especialmente correcta en el estudio de grandes desplazamientos verticales dentro de la troposfera.

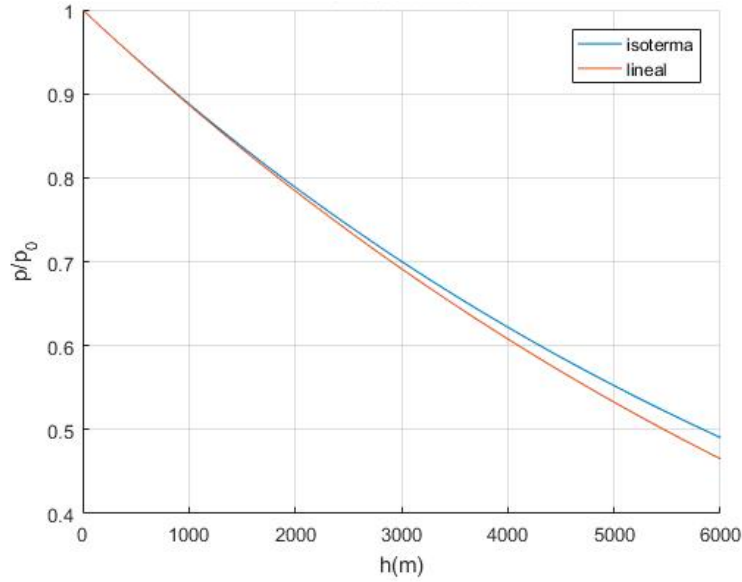


Figura 9: Variación de presión con la altura en atmósfera isoterma y en atmósfera con variación de temperatura lineal. [12]

1.3.2. Variación de la densidad con la altura.

De misma manera que la presión podemos estudiar la variación de la densidad con la altura.

$$P = \frac{\rho}{M} RT \Rightarrow \rho = \frac{PM}{RT} \Rightarrow P = P_0 e^{-\int_0^z \frac{Mg}{RT} dz} \quad (11)$$

- Si $T(z) = T_0$:

$$P = P_0 e^{-Z/H} \Rightarrow \frac{\rho}{M} RT_0 = \frac{\rho}{M} RT_0 e^{-Z/H} \Rightarrow \rho = \rho_0 e^{-Z/H} \quad (12)$$

- Si $T(z) = T_0 + L(z)Z$:

$$P = P_0 \left[\frac{T_0}{T(Z)} \right]^{\frac{Mg}{RL}} \Rightarrow \rho T = \rho_0 T_0 \left[\frac{T_0}{T(Z)} \right]^{\frac{Mg}{RL}} \quad (13)$$

$$\rho = \rho_0 \left[\frac{T_0}{T(Z)} \right]^{\frac{Mg}{RL} + 1} \quad (14)$$

[3] [12]

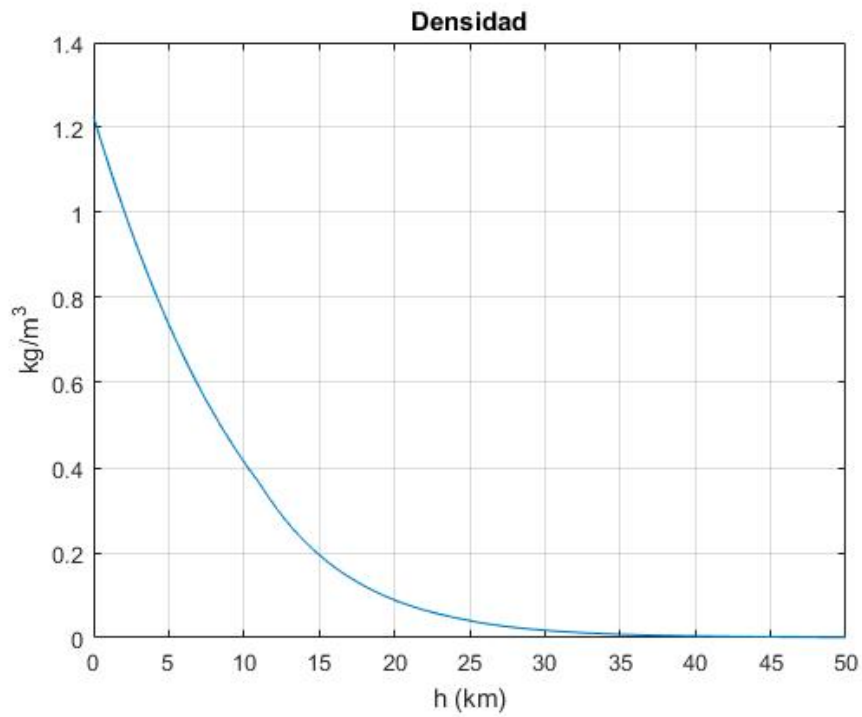


Figura 10: Variación de la densidad con la altura. [12]

1.4. Estabilidad atmosférica y procesos adiabáticos.

En este apartado hablaremos sobre la estabilidad atmosférica y los procesos adiabáticos, los cuales juegan un papel muy importante en las condiciones meteorológicas que podemos esperar en un momento y lugar determinados.

El término parcela de aire se refiere a un volumen pequeño e imaginario de aire y se utiliza para explicar el comportamiento de este. Las parcelas son suficientemente grandes como para contener un gran número de moléculas, pero también suficientemente pequeñas para que las propiedades que se les asignan sean propias de la totalidad de la parcela [13]. La estabilidad atmosférica se define como la resistencia del aire a moverse verticalmente en la atmósfera. Podemos definir tres tipos de estabilidad en función de cómo se comporte una parcela de aire que forzamos a ascender. En caso de que esta parcela vuelva a su posición de origen diremos que estamos ante aire estable, es decir, la parcela se resiste a ascender verticalmente en la atmósfera; si tiende a mantener la posición en la que la colocamos estaremos hablando de estabilidad neutra y por último, si la parcela tiende a seguir ascendiendo, alejándose cada vez más de su posición de equilibrio, nos referiremos a esta situación como aire inestable. El motivo por el cual una parcela de aire puede ascender o descender es la diferencia de densidad de dicha parcela con el aire que la rodea. Teniendo en cuenta la estrecha relación entre densidad y temperatura, se podría decir que la estabilidad o inestabilidad atmosférica depende de esta. Imaginemos un entorno a 10°C , en el caso de tener una parcela de aire a 15°C esta ascenderá al ser menos densa, presentando condiciones inestables. De ser la parcela de misma temperatura se mantendrá en la misma posición, neutra. Si por el contrario la temperatura es menor, esta descenderá presentando unas condiciones estables.

Visto esto sabemos que la estabilidad atmosférica depende de la relación entre las temperaturas de una parcela de aire y su entorno. Para entender los condicionantes de la temperatura de una parcela de aire debemos saber qué son los procesos adiabáticos. Este es un proceso por el cual no se intercambia calor con el entorno. Meteorológicamente hablando, un proceso adiabático es aquel en el que una parcela cambia su temperatura sin absorber o ceder calor, mediante cambios de presión. A menores presiones el aire se expande, aumentando el volumen y disminuyendo la temperatura.

En la atmósfera terrestre la presión disminuye a medida que la altura aumenta, es por eso que al ascender una parcela de aire se expande enfriándose adiabáticamente. Esta variación de la temperatura de la parcela con su altitud se conoce como gradiente adiabático, existiendo tanto gradiente adiabático seco como húmedo.

- **Gradiente adiabático seco.(DALR)** Es el ritmo con el cual cambia la temperatura de una parcela de aire seco con la altitud. Tiene un valor cercano $9,8^{\circ}\text{C}/\text{km}$ y solo se aplica a parcelas de aire secas, aquellas con un $\text{RH} < 100\%$ ya que en estos casos no tendrán lugar procesos de condensación o evaporación.
- **Gradiente adiabático húmedo.(SALR)** Es el ritmo con el cual cambia la temperatura de una parcela de aire húmedo con la altitud. Tiene un valor medio de $5,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ que varía estando a altas o bajas temperaturas. Esta variación es debida a los procesos de evaporación y condensación que tienen lugar en este tipo de parcelas. Al enfriarse adiabáticamente una parcela de aire húmedo el vapor de agua comienza a condensarse liberando un calor latente que ralentiza el proceso de enfriamiento del aire. Por el contrario de calentarse la condensación será menor y tendremos un ritmo de enfriamiento mayor.

La estabilidad atmosférica dependerá de la relación entre estos gradientes y el perfil vertical

de temperatura. Hemos visto que en la troposfera, capa en la que tienen lugar estos movimientos de aire, la temperatura desciende con la altura, siguiendo un gradiente cercano a $-6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ que dependerá de las condiciones atmosféricas.

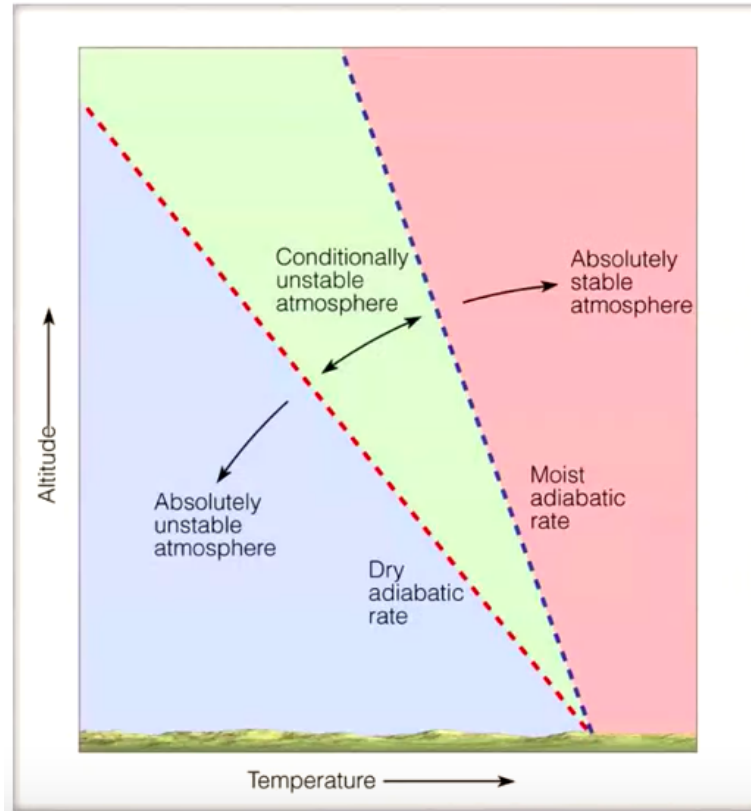


Figura 11: Escala temporal geológica. [14]

Dicha relación se presenta en la Figura 13, siendo posibles los siguientes casos:

- **Estabilidad absoluta.** Se da cuando el gradiente vertical de temperatura ambiente es menor que el gradiente adiabático húmedo.
- **Inestabilidad absoluta.** El gradiente vertical de temperatura es mayor que el gradiente adiabático húmedo.
- **Inestabilidad condicional.** Se presenta cuando el gradiente de temperatura ambiente se encuentra entre el gradiente adiabático seco y el húmedo.

Estos tipos de estabilidad atmosférica juegan un papel muy importante en el desarrollo de fenómenos meteorológicos. En condiciones estables podemos esperar un cielo despejado o con nubes estratificadas, viento ligero, inversiones de temperatura... sin embargo para condiciones inestables esperamos nubes de gran desarrollo vertical, tormenta, precipitaciones...

Los diagramas termodinámicos que reflejan esta información son indispensables para poder realizar predicciones meteorológicas acertadas de un lugar concreto y serán objeto de estudio en los siguientes apartados. [14]

1.5. Sondeos meteorológicos.

La inquietud sobre los fenómenos meteorológicos y su intento de predicción es algo inherente al ser humano y desde que existimos hemos estado buscando continuamente formas de anticiparnos a estos sucesos.

La radiosonda consiste en un instrumento meteorológico destinado al estudio de las propiedades del aire a una determinada altura. La historia de estos aparatos de medida comienza con el lanzamiento el 17 de enero de 1929, por parte del meteorólogo Robert Bureau, de un dispositivo capaz de obtener datos de presión y temperatura hasta una altitud de 13.000 metros.

Desde ese momento las radiosondas han ido evolucionando hasta convertirse en unas pequeñas cajas de poliestireno, de algo más de 200 gramos de peso, que cuentan con barómetro, termómetro e higrómetro, además de un transmisor de radio para enviar los datos recogidos. Sujetas a un globo meteorológico llenado generalmente con helio o hidrógeno ascienden hasta una altura aproximada de 30 km a una velocidad aproximada de 300 metros por minuto.

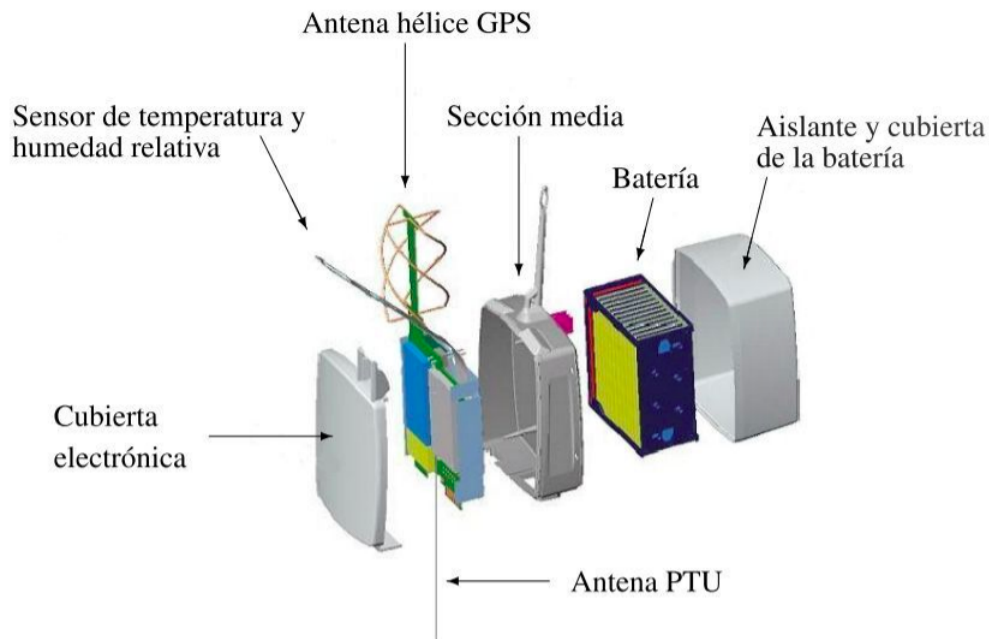


Figura 12: Partes de una radiosonda. [4]

Actualmente la red de radiosondeo en España cuenta con 10 estaciones situadas en A Coruña, Madrid, Murcia, Palma, Santander, Zaragoza, Barcelona, Lleida, Bilbao y Tenerife. En cada una

de ellas se realizan dos sondeos diarios generalmente a las 00:00h y a las 12:00h.[15]

Gracias a las radiosondas y a los diagramas en los que se representa toda la información obtenida por estas, los meteorólogos son capaces de interpretar las condiciones atmosféricas y predecir que sucesos meteorológicos futuros tendrán.[4]

1.6. Predicción meteorológica.[17]

El diagrama termodinámico es la herramienta que se utiliza en meteorología para analizar los datos del sondeo atmosférico en el proceso de preparación de las predicciones del tiempo. En esta sección haremos un estudio en profundidad de dos de los diagramas más utilizados a la hora de realizar estas predicciones, el tefigrama y el diagrama oblicuo T-log P.

1.6.1. Tefigramas.

Los tefigramas se utilizan para trazar perfiles verticales de temperatura, humedad y viento.

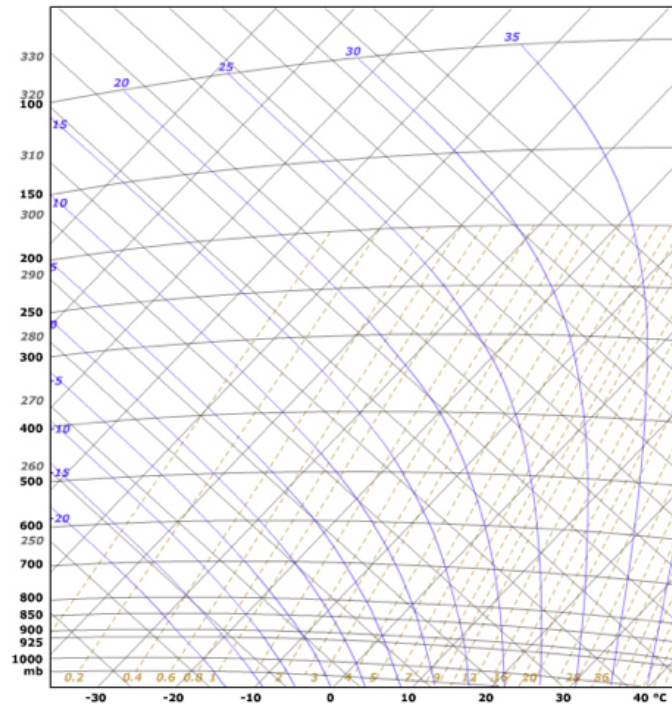


Figura 13: Tefigrama vacío.

Describiremos las distintas líneas que forman el tefigrama y cómo se trazan los datos sobre este. Las líneas casi horizontales son las isobaras. Suelen estar pintadas en verde o negro. Comienzan en 1050 hPa en la parte inferior del diagrama y se espacian logaritmicamente en intervalos de 50

hPa hasta los 100 hPa.

Las líneas rectas continuas e inclinadas, generalmente en negro, son las isotermas, líneas de temperatura constante. En nuestro caso se trazan en un intervalo de 10°C desde los -30°C a los 40°C .

Las líneas adiabáticas secas indican la razón de cambio de temperatura para una parcela de aire seco que asciende o desciende adiabáticamente. En el tefigrama vienen representadas por líneas continuas y ligeramente inclinadas que parten de la parte inferior derecha hasta la parte superior izquierda. Se representan en kelvin y en intervalos de 10 o 20 K y sus valores se representan en gris a la izquierda del eje Y.

También se representan las adiabáticas saturadas, que al igual que las secas responden a la variación de la temperatura de una parcela de aire saturado que asciende o desciende adiabáticamente.

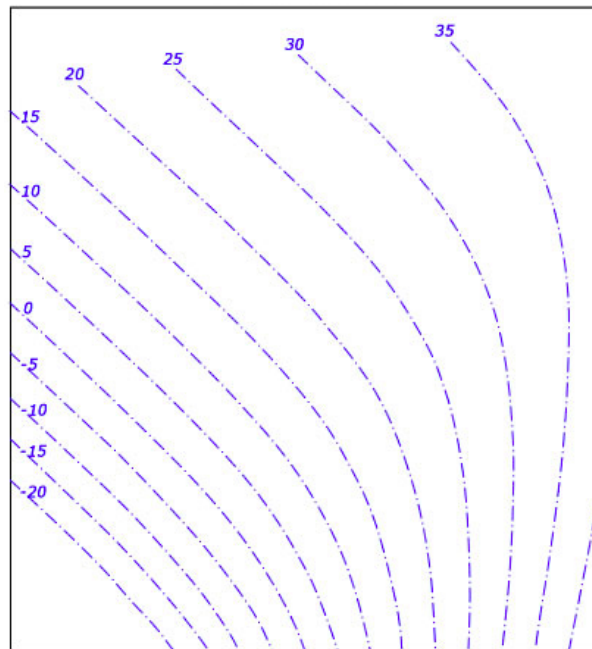


Figura 14: Adiabáticas saturadas.

Se representan de la manera mostrada en la Figura 14 y es de notar que tienden a volverse paralelas a las adiabáticas secas a valores bajos de temperatura, presión y humedad. En estas líneas está indicada su correspondiente valor de temperatura en $^{\circ}\text{C}$ en el punto de intersección con la isobara en 1000hPa.

Las líneas anaranjadas y discontinuas, que se extienden desde la izquierda inferior del gráfico hacia la parte superior derecha, son las líneas de razón de mezcla de saturación. Representan la cantidad de agua necesarias para saturar un kilogramo de aire seco a una temperatura y presión dada. Los valores se representan en g/kg, desde 0,2 hasta 36.

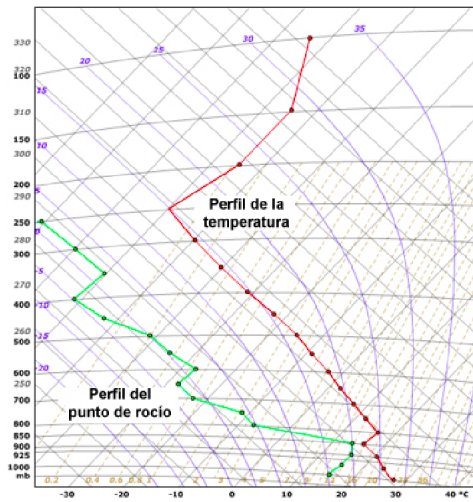


Figura 15: Tefigrama con perfiles.

Conocidos los elementos del tefigrama, pasamos a las representaciones que se hacen sobre estos. Además del perfil vertical de temperatura, se representa el perfil del punto de rocío, es decir la temperatura a la cual una parcela de aire a presión constante se satura sin la adición de vapor de agua.

Otra información que aporta el tefigrama es una columna del perfil de viento, representado a la derecha del gráfico de la forma presente en la Figura 16.

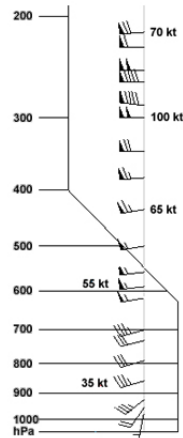


Figura 16: Diagrama del viento.

La velocidad se mide en nudos y viene representada por una flecha sobre la que encontramos banderas y barbas. La bandera representa 50 nudos mientras que la barba 10 nudos y las media barbas 5 nudos. La línea sobre la que se representan estos elementos indica la dirección de la que sopla el viento.

Explico a continuación los distintos parámetros que podemos obtener con el correcto tratamiento de los datos en el tefigrama, datos indispensables a la hora de realizar predicciones meteorológicas.

- **Razón de mezcla de saturación** Responde a ω_s y se trata de la proporción de la masa del vapor de agua (M_v) con respecto a la masa de aire seco (M_d) en una parcela de aire saturada. Es decir, la máxima cantidad de agua que puede contener una parcela saturada sin producir condensación.

$$\omega_s = M_V/M_D \quad (15)$$

Para encontrar este valor para una presión buscaremos el corte de esta con el perfil de temperatura y utilizaremos las líneas de mezcla de saturación anteriormente mencionadas.

- **Razón de mezcla.** La razón de mezcla ω también mide la razón de la masa del aire frente a la masa de aire seco, la diferencia con la anterior es que esta mide la cantidad de vapor de agua presente, y no la presente en caso de saturación que se medía antes.

El proceso de cálculo en el tefigrama es exactamente el mismo buscando esta vez el corte de la presión con el perfil del punto de rocío.

- **Humedad relativa.** Se expresa como un % y representa la cantidad de vapor agua en un volumen de aire frente a la que tendría esa parcela de estar saturada.

$$HR = 100 \cdot \frac{\omega}{\omega_s} \quad (16)$$

- **Depresión del punto de rocío.** Es la diferencia entre a temperatura y la temperatura en un cierto nivel de presión. Generalmente los datos de humedad se dan en términos de la depresión del punto de rocío. Este será cero en situaciones de saturación y mas grande en condiciones secas.
- **Presión de vapor de saturación.** Expresada como e_s , representa la parte de la presión atmosférica total que se atribuye al vapor de agua cuando el aire está saturado. Para obtener este valor en el tefigrama, partimos de una temperatura dada hasta el valor de presión 622hPa y desde ahí seguimos la línea de mezcla de saturación, la cual nos dará en hPa la presión de vapor de saturación.
- **Presión de vapor.** Se expresa como e y es la parte de la presión atmosférica total que se atribuye al vapor de agua. El proceso para encontrarla en el tefigrama es igual que en el caso anterior, utilizando esta vez la temperatura del punto de rocío.
- **Temperatura virtual** Entendemos por temperatura virtual aquella en la cual el aire seco tiene la misma densidad que el aire húmedo a una presión dada. Esta temperatura siempre es igual o mayor a la temperatura real, ya que el vapor de agua es menos denso que el aire seco y el aire cálido es menos denso que el aire frío. Responde a la fórmula 17.

$$T_V = T + \frac{\omega}{6} \quad (17)$$

- **Temperatura potencial.** La temperatura que tendrá una parcela de aire que sigue un proceso adiabático seco, hasta llegar a una presión de 1000 hPa se conoce como temperatura potencial y se expresa como θ .
- **Nivel de condensación por ascenso (NCA).** Se trata de la altura en la que una burbuja de aire se satura cuando asciende según un proceso adiabático seco.

Para encontrar este punto en el tefigrama debemos cortar la línea de razón de mezcla de saturación que pasa por el punto de rocío con la adiabática seca que parte de la temperatura dada para la presión que nos interesa.

- **Temperatura equivalente.** Temperatura que una muestra de aire en un nivel de presión dado tendría si toda la humedad se condensara durante su ascenso pseudoadiabático. El proceso para el cálculo de esta temperatura se refleja en la Figura 17.
- **Temperatura potencial equivalente.** Es la temperatura que tendrá una parcela de aire que tras un proceso pseudoadiabático pierde toda su humedad y luego se trae de vuelta al nivel de los 1000 hPa. Como concepto es el mismo que el de la temperatura equivalente salvo que en este caso la muestra sigue un proceso adiabático seco para evolucionar. El proceso es el mismo que el mostrado en la Figura 17 salvo el último paso, en lugar de extender la adiabática seca que dibujamos hasta la temperatura de la que partimos, esta vez la llevamos hasta el corte con los 1000hPa.

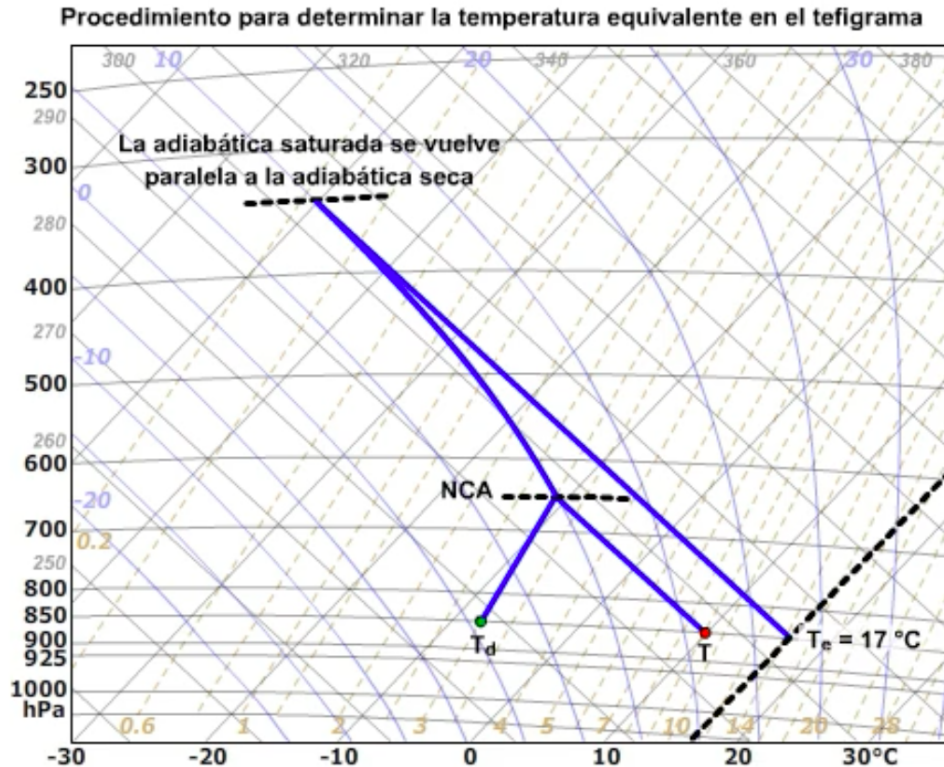


Figura 17: Representación del cálculo del NCA y de la temperatura equivalente

- **Temperatura del termómetro húmedo.** Hace referencia a la temperatura que alcanza una parcela de aire presión constante que se enfría debido al vapor de agua que contiene, produciéndose la saturación. Esta temperatura, T_W , se encuentra entre la temperatura de rocío y la de entorno, salvo cuando el aire está saturado que las tres son iguales. Esta temperatura responde a la temperatura de la superficie al inicio de una precipitación. Para su cálculo, partimos del NCA y descendemos según una adiabática saturada hasta la presión correspondiente a la temperatura de que partimos.
- **Temperatura potencial del termómetro húmedo.** Como se puede intuir por lo ya visto, esta temperatura es igual a la anterior con la diferencia de que esta vez la muestra sigue el gradiente adiabático húmedo hasta una presión de 1000hPa.
- **Nivel de condensación por convección.** El NCC es el nivel al cual subirá adiabáticamente una parcela de aire al ser calentado hasta saturarse. En este nivel se encuentran las bases de las nubes cumuliformes. Para encontrar este nivel en el tefigrama seguiremos desde la temperatura de punto de rocío en la superficie una línea de razón de mezcla hasta que esta se corte con la temperatura ambiente.
- **Temperatura de disparo.** Expresada como T_c representa la temperatura que debe alcan-

zarse en la superficie para comenzar a formarse nubes convectivas. Se obtiene siguiendo una adiabática seca desde el NCC hasta la superficie.

- **Nivel de convección libre.** Este nivel, conocido como NCL representa la altura en la que una parcela de aire se vuelve más caliente que su entorno y asciende por convección. Lo obtenemos partiendo del NCA y siguiendo una adiabática saturada hasta el corte de esta con la temperatura ambiente.
- **Nivel de convección por mezcla.** Es la altura a la que se produce saturación después de que se haya mezclado completamente una capa. Este cálculo es más complicado que los anteriores y se resume en la Figura 18. Lo primero que debemos conocer es la parte superior de la capa de mezcla, ese dato se estimara según los datos que tengamos del lugar donde se realiza la predicción. Lo siguiente que debemos calcular es la adiabática seca promedio y la razón de mezcla promedio. Esto se hace trazando estas líneas de manera que las áreas comprendidas entre ellas y los perfiles de temperatura de punto de rocío o temperatura ambiente respectivamente, son iguales. En el punto donde estas líneas se corten tendremos el NCM.

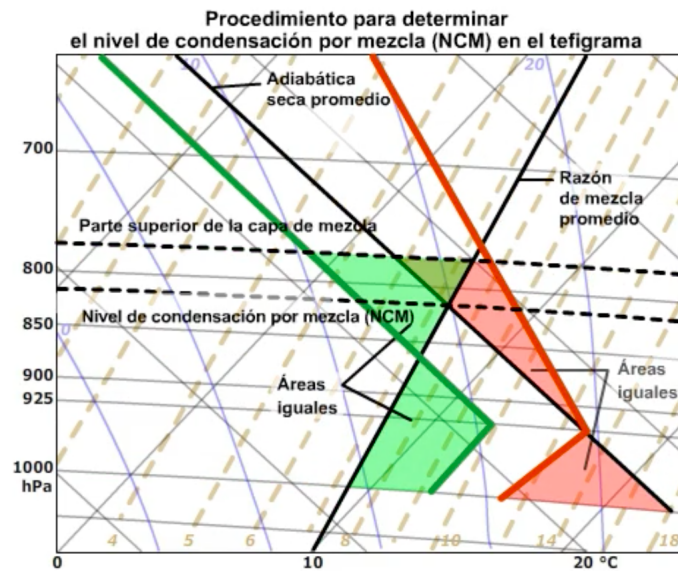


Figura 18: Cálculo del NCM.

- **Nivel de equilibrio.** Como ya mencionamos en apartados anteriores, este punto es en el que una parcela de aire que asciende encuentra una temperatura igual a la suya. Debemos tener en cuenta que esta parcela puede ascender mecánicamente o por calentamiento. Se obtiene partiendo del NCL y siguiendo una adiabática saturada hasta el corte con el perfil de temperatura ambiente.

- **Nivel máximo de la parcela.** Cuando una parcela de aire asciende hasta alcanzar su nivel de equilibrio, esta no se detiene al instante si no que sigue ascendiendo pero sin ganar ya aceleración, el nivel máximo que puede alcanzar lo conoceremos por nivel máximo de la parcela y se obtendrá según lo mostrado en la Figura 19. Es un nivel que pronostica la altura máxima de una tormenta.

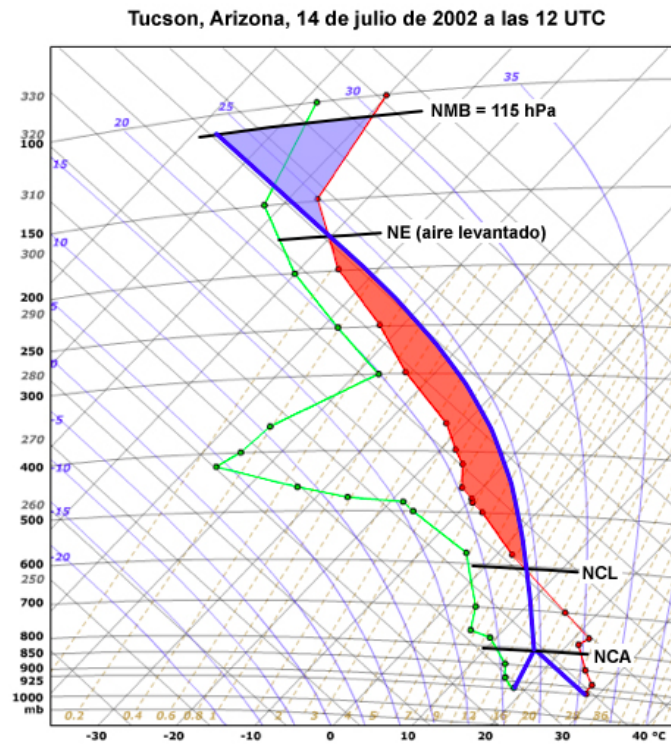


Figura 19: Cálculo del nivel máximo de la parcela.

1.6.2. Diagrama oblicuo.

La diferencia entre este diagrama y el tefograma es mínima, permitiéndonos ambos calcular los parámetros anteriormente mencionados de una manera muy similar. No repetiré el proceso de cálculo de estos parámetros pues entendiendo dicho proceso en el tefograma, se podrá realizar tanto en un diagrama como en otro, dependerá más de una cuestión de comodidad.

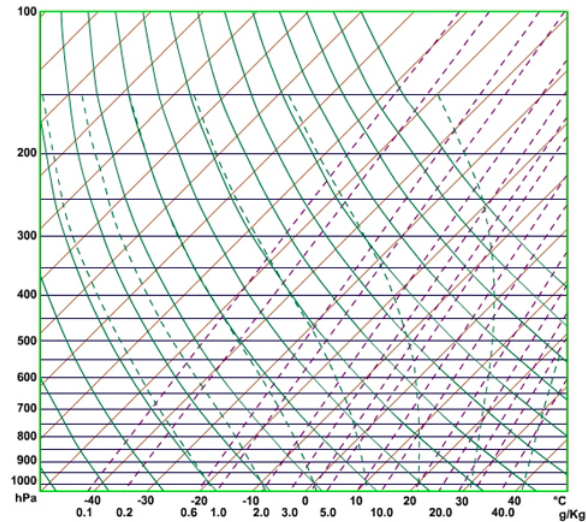


Figura 20: Diagrama oblicuo.

Observando la Figura 20 vemos que el diagrama en si es muy similar, y entendiendo el tefograma entenderemos también este donde isobaras son rectas e isotermas y líneas de razón de mezcla siguen igual. El mayor cambio se presenta en las adiabáticas, tanto secas como húmedas, que se representan de manera ligeramente distinta. Dicha diferencia se observa en la Figura 21.

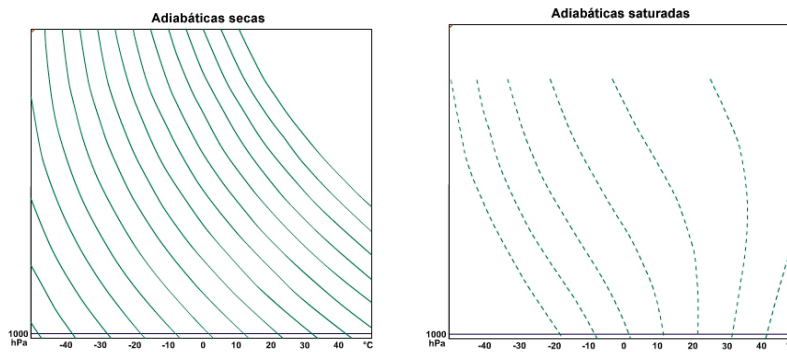


Figura 21: Líneas adiabáticas secas y saturadas en diagrama oblicuo.

2. Construcción de la sonda.

Con el fin de ponerme en contacto con empresas e instituciones que estuviesen interesadas en colaborar con el proyecto, he diseñado una página web que sirve como tarjeta de presentación para las mismas. En esta expongo los objetivos del proyecto, además de explicar brevemente todo el trabajo realizado. El link de la página es el siguiente:

<https://sites.google.com/view/carmafly/inicio?authuser=0>

2.1. Electrónica.

A la hora de llevar a cabo este proyecto, las diferentes partes asociadas a la construcción del mismo han ido desarrollándose simultáneamente, pero si debemos comenzar con algo es sin duda con la parte electrónica.

El objetivo que se nos planteaba era la construcción de un sistema capaz de medir y almacenar datos de presión, humedad y temperatura. Mi experiencia hasta el momento en este ámbito se basaba en el haber cursado la asignatura de Electrónica del Grado de Física de la Universidad de Oviedo. Con este conocimiento, y un presupuesto propio de un estudiante, comienza la búsqueda de un sistema que nos permita realizar estas medidas a un bajo coste. Debemos tener en cuenta que el peso de la sonda se verá directamente relacionado con la altura que esta alcanzará.

El primer aspecto que determinará la complejidad de nuestra electrónica es el cómo vamos a obtener los datos. Existen dos opciones, la primera es conseguir que nuestra sonda los envíe por radiofrecuencia, de la misma forma que se hace en los sondeos diarios de la AEMET y al igual que realizó ASHAB, un grupo de ingenieros de telecomunicaciones asturiano cuyo proyecto *Near Space One* inspiró a este. La segunda forma consiste en recuperar la sonda tras su aterrizaje y es el procedimiento utilizado en otros experimentos como el Proyecto Yuri , el proyecto Chasat o el proyecto Canda-Sat¹.

La recuperación del globo es la gran diferencia entre los métodos y, en mi caso, esta recuperación es indispensable, ya que el viaje será grabado por dos cámaras GoPro que debo recuperar. Teniendo en cuenta esto, la ventaja del primer método reside en la seguridad de obtener los datos de presión, humedad y temperatura a distancia, independientemente del lugar de aterrizaje del globo.

A la hora de construir un sistema para la emisión de los datos, necesitaríamos una Raspberry Pi, una emisora portátil de radioaficionado y un circuito para conectarlas.

La Raspberry Pi es un microordenador que acerca el desarrollo en informática y electrónica a todos los usuarios. Se basa en el hardware libre y utiliza sistemas operativos libres basados en GNU/Linux. Su precio ronda los 30 euros en función del modelo. En nuestro proyecto su función sería la de ordenador a bordo, encargado del funcionamiento de termómetros, barómetro e higrómetro, así como el almacenamiento de estos datos.

Una de las emisoras de radioaficionado que podríamos utilizar se trata de la Baofeng UV5R una emisora legal en España cuyo precio ronda los 40 euros y es capaz de emitir hasta unos 30 km de distancia.

Estos datos obtenidos deben ser codificados y enviados una determinada frecuencia para que otro receptor de radioaficionado los decodifique mientras tanto en tierra.

Los conceptos necesarios para el desarrollo de este proceder fueron estudiados y no fueron los culpables de que este método se descartara. Si lo fue el notar que la seguridad que nos aporta este

¹Hablaremos más adelante de estos proyectos y de su aportación al desarrollo de Carmafly.

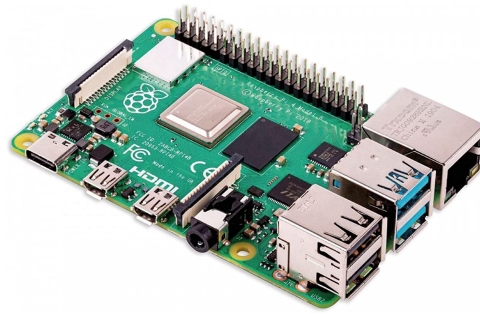


Figura 22: Ordenador Monoplaca, Raspberry Pi 4 Modelo B.



Figura 23: Emisora de radio Baofeng UV5R.

método de obtener los datos al momento se obtiene a través de una inversión que hace aún más indispensable la recuperación del globo.

Es por eso que, tras poner en una balanza todos estos aspectos, decido que la obtención de los datos llegará tras recuperar el globo, ya que estos datos no son lo verdaderamente importante de este proyecto, y sí lo es el proceso de estudio y el trabajo empleado en la consecución de este.

Una vez tomada esta decisión no es necesaria una Raspberry Pi, y bastará con utilizar ARDUINO, una placa de creación electrónica de código abierto basada en software libre, flexible y sencillo de utilizar.

Decidida la placa sobre la que construir se pasa a los diferentes aparatos de medida que se implementarán en esta. Debemos ser conscientes de las condiciones extremas a las que se someterán estos dispositivos.



Figura 24: ARDUINO UNO

El primer sensor con el que comenzó el proyecto fue el BMP280, un barómetro y termómetro digital fabricado por BOSCH. Según la ficha técnica del fabricante los rangos en los que trabaja el sensor son 300~1100 hPa y -40~85 °C con una incertidumbre de ± 1 hPa y $\pm 1^\circ\text{C}$. El uso de este dispositivo se justifica con su precio, sobre todo por ser barómetro. Es cierto que se queda un poco corto teniendo en cuenta el ambiente en el que se usará pero repito que resulta muy difícil encontrar un barómetro por este precio o similar. En cuanto al rango del termómetro es algo que no me preocupa, pues servirá como termómetro interior, comprobando el aislamiento de la caja y se incluirán otros termómetros con mayor precisión.



Figura 25: BMP280

El dato de la presión gana relevancia al ser el indicador de la altura del globo. Por este motivo se buscó un barómetro de mayor precisión a presiones bajas. Estos dispositivos son muy específicos y se suelen vender al por mayor a grandes empresas. Mi objetivo era sustituir el BMP280 por el HSCDANN015PA2A3, un barómetro que justificaba su precio con su precisión. Tras ponerme en contacto con proveedores tanto europeos como americanos y recibir su negativa a la hora de colaborar con el proyecto, este barómetro queda lejos de mi alcance, y el BMP280 actuará adecuadamente como barómetro y termómetro interior.

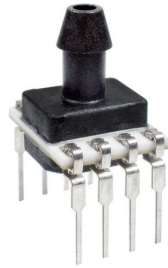


Figura 26: HSCDANN015PA2A3

Similar al BMP280, el BME280 es un dispositivo del mismo fabricante capaz de medir humedad, presión y temperatura. El dato de la humedad es indispensable a la hora de trazar un perfil vertical y este dispositivo, cuya marca ya conocemos cumple con los requisitos necesarios.

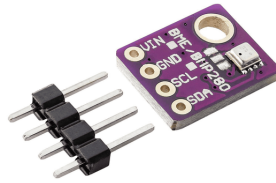


Figura 27: BME280

Sin embargo a la hora de realizar las conexiones y programación del mismo no consigo un correcto funcionamiento y me veo obligado a buscar otro higrómetro.

Siguiendo las recomendaciones de Javier Redondas Maseda, director de *Candasat*[29], utilizo un DHT22.



Figura 28: DHT22

Este sensor es capaz de medir la humedad con una precisión de $\pm 2\%$ RH y además ofrece la temperatura en un rango de -40°C a 80°C . Teniendo en cuenta que este dispositivo debe ir

fuera de la caja pues es necesario para la correcta medida de la humedad, podríamos también utilizarlos como termómetro exterior. Sin embargo prefiero buscar otro termómetro de mayor precisión.

En un principio, comienzo con la compra y conexión de un termopar tipo K. Los termopares son sensores formados por dos metales diferentes unidos por un extremo. Cuando esta unión se calienta o enfría se produce una tensión que es proporcional a la temperatura. De esta manera obtendríamos un termómetro exterior capaz de sobrevivir a temperaturas extremas y a muy bajo coste.

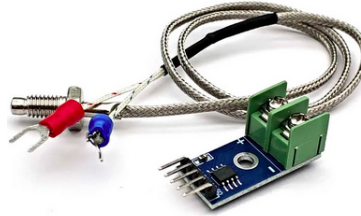


Figura 29: Módulo MAX6675 + módulo termopar tipo K.

Pese al correcto funcionamiento de este, opto por buscar un sensor de mayor precisión ya que el termopar presenta un ligero desfase a la hora de dar el dato, el cual temo que aumente en condiciones extremas. Este es el motivo por el cual utilizaré un termómetro de gran precisión como es el DS18B20.



Figura 30: Termómetro DS18B20 de AZDelivery.

Realmente este es un sensor para medir líquidos, sin embargo, encaja con nuestro presupuesto rondando los 8 euros y con el rango de temperaturas que va a sufrir nuestra caja, llegando hasta los -55° según la información del fabricante. Este dato es el mínimo garantizado por el distribuidor pero según los comentarios de otros clientes puede medir correctamente hasta temperaturas cercanas a -65°C .

En este punto ya disponemos de dos termómetros exteriores, uno interior, un higrómetro y un barómetro, dispositivos suficientes para nuestro sondeo. La información medida por estos irá a una tarjeta SD para lo que necesitamos un lector de esta.



Figura 31: Lector de tarjetas SD.

Otros elementos que no hemos mencionado y son necesarios para el patillaje, conexiones y alimentación del circuito son:

- Una pila de 9V, con su correspondiente conector tipo Jack.
- Resistencias para los distintos sensores.
- Mini-placa breadboard.
- Cable macho-hembra y macho-macho de 10cm.

El patillaje y el resultado final se muestran en las Figuras 32 y 33. Correspondiéndose el elemento 1 al termómetro DS18B20, el 2 al DHT22, el 3 al BME 280 y el 4 al lector SD [18]

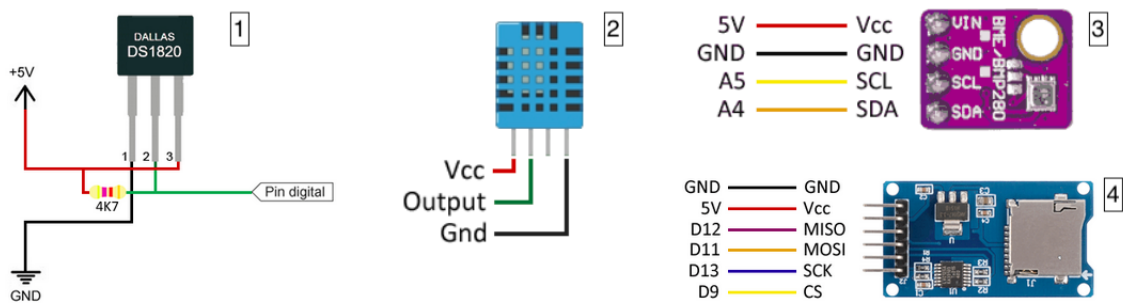


Figura 32: Conexiones del circuito. [18]

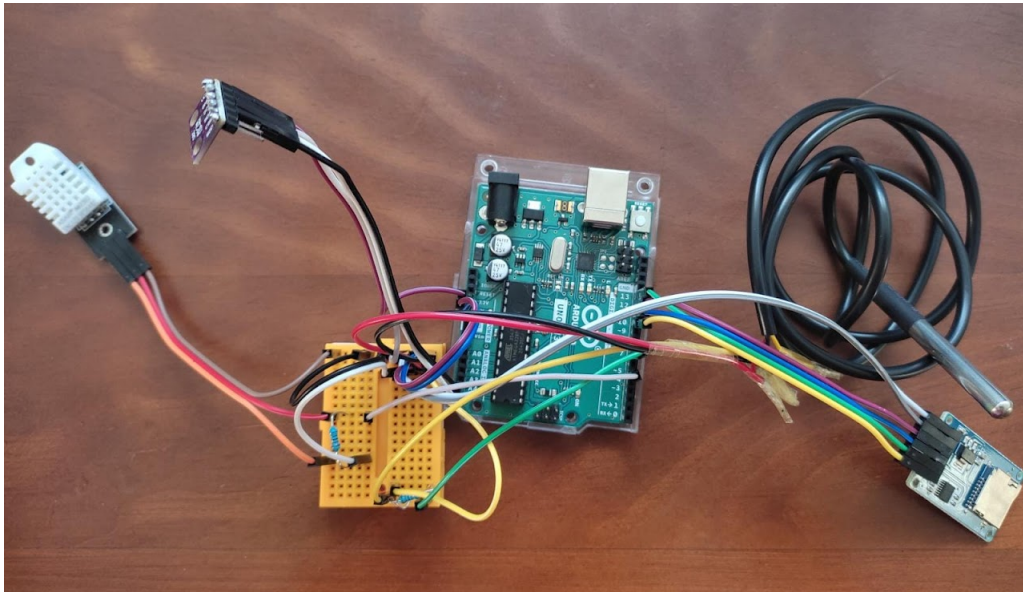


Figura 33: Resultado final sin la pila.

2.2. Cámaras

Nuestro ascenso será grabado por dos cámaras GoPro que irán a bordo de la caja. Estas cámaras enfocarán tanto al horizonte como a la superficie terrestre.



Figura 34: Primera cámara, su carcasa y su batería portátil.

Las GoPro son unas cámaras ideales para este tipo de proyecto, ya que su ligereza se combina con el ser resistentes a situaciones extremas. Sin embargo, estas condiciones pueden reducir considerablemente la duración de la batería de las mismas y es por eso que debemos incluir una batería portátil para cada una de ellas.

La primera cámara se observa en la Figura 34, y será la encargada de grabar el horizonte. Se trata de una GoProHero 3 de la cual ya disponía antes de comenzar el proyecto. La batería

externa, se trata de una Gopro Abpak-401 3,8V 1240mAh, una batería de la marca oficial de GoPro ya descatalogada y que tuve la gran suerte de conseguir a través de una tienda de fotografía mallorquina llamada FotoRuano[19].



Figura 35: Batería externa Gopro Abpak-401.

La segunda cámara es una GoPro Hero Session que adquiero a través de Wallapop. Esta versión más moderna, no necesita carcasa y es más pequeña, pero no dispone de una batería portátil que se adapte tan bien a nuestro propósito como si encontramos para la HERO 3. Utilizamos entonces una batería externa que realmente fue diseñada para otra versión de GoPro con conexión tipo C que no es nuestro caso, pero cuyas dimensiones se ajustan a lo que estamos buscando. Como se aprecia en la Figura 36 y partiendo de izquierda a derecha contamos con la cámara, un cable micro-USB a USB , una conexión USB-USB, un transformador USB-Tipo C hembra y la batería externa con conexión tipo C.



Figura 36: Segunda cámara y conexión a batería externa.

Con esto la duración de la batería de las cámaras supera las cuatro horas a temperatura ambiente, sin embargo, debemos comprobar el correcto funcionamiento de estas ante temperaturas extremadamente bajas.

2.3. Caja aislante.

A la hora de construir la caja las propiedades del material a buscar han de ser la ligereza y el aislamiento térmico, pues será esta la encargada de mantener a los dispositivos en condiciones que garanticen su correcto funcionamiento.

Estos motivos justifican el uso de una caja de espuma de poliestireno, de las comúnmente utilizadas como neveras. En mi caso con un volumen de 2,39 L y unas dimensiones exteriores de 24x20x15,5 cm.



Figura 37: Caja de poliestireno.

Debo realizar dos aperturas en el poliestireno que permitan a las cámaras tener el mayor campo de visión posible, sin poner en riesgo el aislamiento interior. El proceso se realiza con un cúter y no presenta grandes dificultades, salvo el mantener la resistencia en la zona de la caja donde se hace el agujero. El proceso y resultado de uno de los dos orificios se presenta en la Figura 38.



Figura 38: Orificio para salida de una de las cámaras.

Lo siguiente a añadir en la caja es una manta térmica que reduzca aún más el impacto térmico en el interior. Esta manta refleja un 90 % de la temperatura según el fabricante y además proveerá a la caja de una capa impermeable que en principio no necesitaremos pero que no está de más. Fácil de conseguir en cualquier farmacia, se muestra en la Figura 39.



Figura 39: Manta térmica.

En las esquinas de la caja incluiremos unas arandelas que servirán para anudar el paracaídas y el globo.

Estas arandelas con tornillo incluyen mosquetón que resulta innecesario en mi caso. Para colocarlas, voy presionando y girando muy cuidadosamente a la altura que me interesa. De no hacerlo con precaución se perderían las muescas del tornillo en el poliestireno y por lo tanto no garanti-



Figura 40: Arandelas.

zarían un firme agarre. También aseguro la firmeza con silicona y ajusto el lado interior mediante una rosca.

Añado también bolsas térmicas, las cuales están diseñadas para introducir en guantes o calzado en situaciones de baja temperatura. Para mi objetivo son perfectas, ya que alcanzan una gran temperatura mientras son ligeras y económicas. Además de todo esto también se realiza un orificio por el que saldrá el termómetro exterior, dejando un resultado final observable en la Figura 41.



Figura 41: Resultado final de la caja.

2.4. Globo y paracaídas.

Una vez con la caja construida, y con la certeza de que el proyecto ya es una realidad, el 7/6/2021 me pongo en contacto con la AEMET a través de su página web[20]. En mi mensaje les hablo sobre mi proyecto, les pido información sobre los permisos necesarios y les dejo la puerta abierta colaborar de cualquier manera. Cuatro días más tarde, Aurora Ortega de la delegación cántabra de la AEMET se pone en contacto conmigo, tanto por correo electrónico como por llamada, y me informa de que me proporcionarán dos paracaídas y dos globos, de los utilizados habitualmente para los sondeos. Sin embargo, esta no es la ayuda más importante que me proporciona, ya que me ponen en contacto con Carlos Fernández Freire, jefe de la Oficina Meteorológica del Aeropuerto de Santander en AEMET, quien había sido parte fundamental del desarrollo del Proyecto Yuri[30].

El Proyecto Yuri tiene lugar en 2018 y consiste en una actividad divulgativa y científica que surge de la colaboración entre el departamento de física y química del IES Valle del Saja, la delegación territorial de AEMET en Cantabria, la Textil Santanderina, Meteorológica y la Conserjería de Educación Cultura y Deporte del Gobierno de Cantabria. El proyecto es similar a este, y consiste en la construcción de un globo sonda dotado de cámaras e instrumentos de medida.

Desde el primer momento Carlos me proporciona una ayuda excepcional y cercana, me informa de todos los aspectos a tener en cuenta y deja su puerta abierta para cualquier tipo de consulta.

El 23 de Julio recibo en mi domicilio un paquete con dos globos y dos paracaídas, así como un lápiz de memoria con información sobre el proyecto Yuri. En este proyecto se utilizan estos mismos elementos, y se incluyen características del globo como su peso, de 350 g.



Figura 42: Globo proporcionado por AEMET. [20]

El funcionamiento del paracaídas no resulta muy eficiente a alturas superiores a los 20 km debido a la baja densidad del aire, pero si resulta indispensable a medida que el globo se acerca a la superficie para proteger a los dispositivos de un impacto que acabe con ellos.

El paracaídas proporcionado es de la marca Totex y esta diseñado para el lanzamiento de radiosondas Vaisala, por lo que incluye una goma en la parte inferior adaptada para este producto que nos será útil para nuestro anclaje.



Figura 43: Paracaídas proporcionado por AEMET.

2.5. Helio.

El llenado del globo se realizará mediante una bombona de helio, la AEMET me avisó de que en ese aspecto no me podían ayudar e intente contactar con empresas proveedoras buscando que alguna estuviese interesada en colaborar con el proyecto. No obtuve respuestas de estas, sin embargo Iván Bustelo Rodríguez, propietario de la empresa Estela Centro Deportivo[32] y amigo personal, quiso colaborar con el proyecto encargándose el de proporcionar dicho helio. Simplemente es necesario decirle la cantidad de helio que me hará falta y el dispondrá sus medios para conseguirlo.

Mi objetivo es entonces realizar los cálculos, en los que estudiaré el comportamiento de un globo en la atmósfera.

$$F_{empuje} = m_{globo} \cdot g + m_{carga} \cdot g \quad (18)$$

$$\rho_0 \cdot V \cdot g = \rho \cdot V \cdot g + m_{carga} \cdot g \quad (19)$$

$$\rho = \rho_0 - \frac{m_{carga}}{V} \quad (20)$$

Comenzamos igualando la fuerza de empuje, que proporcionará el helio, con el peso del equipo. ρ hace referencia a la densidad atmosférica, la cual se considerará constante, ya que el cambio no es tan significativo como para tenerlo en cuenta a la hora del llenado de helio. La densidad de este viene dada por ρ_0 la cual es mayor que ρ , esta variación de densidad está inversamente relacionada con la variación de la temperatura debido a que la presión se iguala, $\rho \cdot T = \rho_0 \cdot T_0$.

- Considerando la atmósfera como una capa isoterma:

$$\rho V = m_T \quad \text{Proceso adiabático: } PV^\gamma = P_0 V_0^\gamma$$

$$\rho_0 e^{-Z/H} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1/\gamma} V_0 = m_T$$

$$\rho_0 e^{-Z/H} e^{+\frac{1}{\gamma} \frac{Z}{H}} V_0 = m_T$$

$$\rho_0 V_0 e^{-(1-\frac{1}{\gamma}) \frac{Z}{H}} = m_T$$

$$e^{-(1-\frac{1}{\gamma}) \frac{Z}{H}} = \frac{m_T}{\rho_0 V_0}$$

$$-(1 - 1/\gamma) \frac{Z}{H} = \ln \frac{m_T}{\rho_0 V_0}$$

$$Z = -\frac{H}{(1 - 1/\gamma)} \ln \frac{m_T}{\rho_0 V_0} \quad (21)$$

En esta expresión Z representa la altura, γ el coeficiente adiabático que tendrá un valor de 1,4 y H se le denomina al cociente $\frac{kT}{mg} = 4,79km$. Sin embargo, como ya hablamos en apartados anteriores, la aproximación de la atmósfera como una capa isoterma no es tan correcta como suponer una variación lineal de temperatura:

- Considerando una atmósfera lineal $T = T_0 - T_Z$

$$\begin{aligned} \rho_0 \left[\frac{T_0}{T} \right]^{1 - \frac{Mg}{R\tau}} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1/\gamma} V_0 &= m_t \\ \left[\frac{T_0}{T} \right]^{1 - \frac{m_g}{R\tau}} \left[\frac{T_0}{T} \right]^{\frac{Mg}{R\tau\gamma}} &= \frac{m_T}{\rho_0 V_0} \\ [T_0/T]^A = \frac{m_T}{\rho_0 V_0}, \quad A = 1 - \frac{Mg}{RT} \left(1 - \frac{1}{\gamma} \right), \quad B = \left(\frac{m_T}{\rho_0 V_0} \right)^{\frac{1}{A}} \\ Z &= -\frac{(1 - 1/B)}{\tau} T_0 \end{aligned} \quad (22)$$

En esta expresión A y B son constantes que dependerán de la masa de la carga. Programamos dichas expresiones teniendo en cuenta sus respectivas constantes usando el lenguaje de programación Python, de tal forma que el día que lleguemos al lugar del lanzamiento, sabiendo la altura que queremos alcanzar y la masa total del equipo, obtendremos un volumen de helio. Normalmente las bombonas no tienen boquilla medidora que nos informe de la cantidad de helio que estamos echando, sin embargo, este problema se solucionará considerando al globo esférico, y midiendo su perímetro con una cinta métrica:

$$V_{esfera} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rightarrow r_{globo} \left(\frac{3V_0}{4\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \rightarrow P = 2\pi r_{globo} \quad (23)$$

Variación de la altura máxima alcanzada en función del volumen de helio inicial

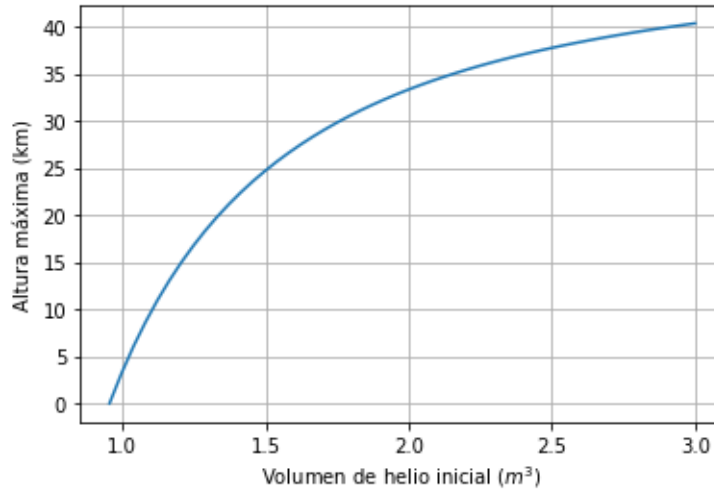


Figura 44: Máxima altura alcanzable en función del helio inicial.

Con el programa creado representamos como varía la altura máxima alcanzada, Figura 44 en función del volumen de helio introducido. Para esta representación tenemos en cuenta una masa total de la carga de 1,16kg y una temperatura inicial de 15°C. Podemos observar que el globo despegará a partir de 0,95 m³ de helio y también que a medida que ascendemos el helio necesario por km aumenta, ya que para los primeros 15 km necesitamos 1,2 m³, para los segundos 15 km necesitamos una cantidad ligeramente superior y a partir de los 30 km el helio necesario para ganar altura se dispara.

Con estos datos y teniendo en cuenta que mi objetivo es alcanzar los 25km el volumen de helio que debería introducir al globo es de 1.523 m³. Sabiendo esto solicitaré una bombona de 3 m³ por si ocurren errores en el proceso de llenado.

2.6. Localizador GPS.

El sistema de localización del globo es sin duda el aspecto más importante ya que un fallo en el mismo dejaría al proyecto sin resultados. Se dedica mucho tiempo en este aspecto buscando un método que nos de certezas dentro de un margen económico favorable, pero también teniendo en cuenta que este es el aspecto en el que más justificado está un esfuerzo económico.

Se barajaron las siguientes alternativas:

- **Transmisores de collares de perros y aves rapaces.** Esta alternativa se deshecha por el alto precio de los mismos.
- **AirTag de Apple.** Este método de seguimiento era perfecto en condiciones de dimensiones, sin embargo su funcionamiento se basa en detectar la posición a través de una conexión Bluetooth en la que todos los iPhones de una zona participan. Resulta por lo tanto muy interesante para ciudades, en las que existen muchos teléfonos triangulando la posición, sin embargo el entorno en el que tendrá lugar el lanzamiento no cumple estas condiciones.
- **GPS Tracker[31]** Este sistema de detección GPS tiene una precisión de entre 5 y 10 metros y funciona con una tarjeta SIM y cobertura móvil. Una vez se llama al número de la tarjeta el GPS automáticamente cuelga y envía un mensaje con las coordenadas de su posición. El gran problema era el posible aterrizaje en una zona sin cobertura.



Figura 45: Invoxia GPS Tracker. [22]

Finalmente nos decantamos por el Invoxia GPS Tracker [22], Figura 45, este es un producto diseñado como un antirrobo para coches y motos. Con un peso de solamente 30g este localizador funciona sin necesidad de tarjeta SIM, ya que utiliza las redes de bajo consumo de SigFox para informar de su ubicación. Esta compañía ha creado en España junto a distintos operadores del país una red de largo alcance y baja velocidad que permite la conexión entre dispositivos, basándose en el IoT (*Internet of things*).

La baja velocidad es algo indiferente, ya que no se necesita un seguimiento al instante de la situación del globo, y basta con saber la posición final. La cobertura de esta red se encuentra en la página web del fabricante y se muestra en la Figura 46.

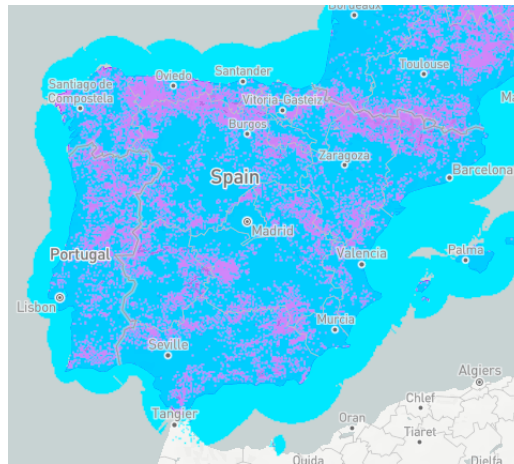


Figura 46: Mapa de cobertura SigFox en España [21]

Invoxia dispone de una aplicación muy intuitiva en la que, tras crearse una cuenta y vincular nuestro GPS, se muestra la posición y los cambios en la misma de la forma que se ve en la Figura 47. Según las indicaciones del fabricante tiene una batería de hasta 6 meses de duración y es capaz de enviar datos de posición cada 5 minutos, algo que no es totalmente cierto.

Desde la compra del mismo sí he comprobado que la batería tiene una larga duración, y que la ubicación es precisa. Los mayores inconvenientes que le veo son que en ocasiones se producen errores puntuales en la ubicación, no por mucha distancia, ni tampoco duran mucho tiempo pero se han de tener en cuenta. También resultan molestos los periodos de actualización de la posición, ya que, si bien es cierto que no necesitamos conocerla segundo por segundo, una actualización de esta que se produjera siempre cada cierto intervalo de tiempo permitiría que de perderse la cobertura en algún punto fuese posible de conocer con exactitud en que punto fue. Al fin y al cabo, el gran problema que presenta es la sensación de inseguridad al no saber cuando va a actualizar una posición, que si suele ser precisa.

Además de esto, una función de la que dispone el equipo es un radar de proximidad vía Bluetooth, este solo funciona en zonas muy próximas al aparato e indica si uno se aleja o se acerca a este. También permite activar una alarma que hace sonar al dispositivo, algo que en nuestro caso puede llegar a resultar interesante, en caso de aterrizar en zona de maleza.

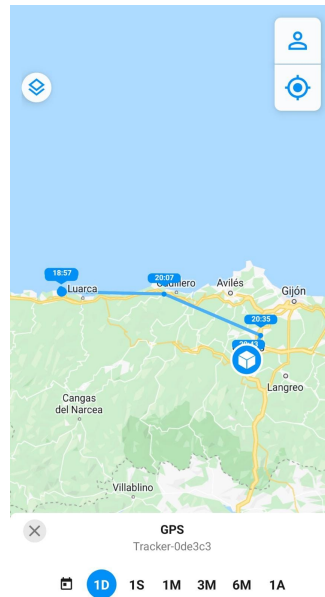


Figura 47: Aplicación móvil Invoxia.

2.7. Pruebas y simuladores.

2.7.1. Prueba de estrés a bajas temperaturas.

Durante el ascenso de nuestra sonda la carga se verá sometida a unas temperaturas extremas que pondrán en riesgo el funcionamiento de los dispositivos electrónicos. Es por esto que el aislamiento de la caja es algo fundamental, ya que mantener la temperatura interior lo más alta posible garantizará un mejor funcionamiento de los dispositivos.

Tras la preparación de la caja ya mencionada me interesa realizar un test de estrés a bajas temperaturas para así saber si el objetivo del aislamiento se ha cumplido con éxito o no.

Se espera que la carga alcance durante el vuelo una temperatura de unos -60°C , temperatura en principio muy alejada de nuestro alcance.

Inicialmente se pensó en el uso de un congelador industrial. Esta idea resultaría sencilla, en primer lugar por el tamaño de estos, en los cuales mi caja entraría perfectamente; y en segundo lugar por la facilidad para mantener una temperatura constante durante un largo periodo de tiempo. Poniéndose en contacto con alguna empresa con un congelador de este tipo a su disposición, realizaríamos fácil nuestras pruebas. Sin embargo el gran problema de este método es que aún estaríamos muy lejos de la temperatura que buscamos ya que estos congeladores rondan los -22°C .

Valorando ventajas e inconvenientes de este método llego a la conclusión de que no me interesa. Tener una temperatura exterior, por constante que sea, que no se acerque a las condiciones que se van a dar en el ascenso, es menos representativo del nivel de aislamiento que una temperatura mínima mucho menor que no se mantenga constante.

Teniendo en cuenta estos intereses, surge la idea del nitrógeno líquido, siendo este inerte, incoloro, inodoro, no corrosivo, no inflamable y extremadamente frío, encaja con lo necesario para mi prueba.



Figura 48: Congelador industrial.

Joaquín González-Nuevo González, tutor de este TFG, me pone en contacto con Cristina Echevarría Bonet profesora-investigadora, integrante del equipo *Nanobien*[16], quien dispone en su laboratorio de nitrógeno líquido para sus experimentos.

El día 1 de marzo de 2022 Cristina nos comunica que dispone de una cantidad de nitrógeno líquido sobrante de un experimento y que puedo utilizarlo en un periodo máximo de 12 horas para mi prueba de estrés térmico. El motivo de ese límite de tiempo es la evaporación del nitrógeno que, pese a estar en un vaso Deward como se puede ver en la Figura 49, no queda exento de esta pérdida continua de masa.

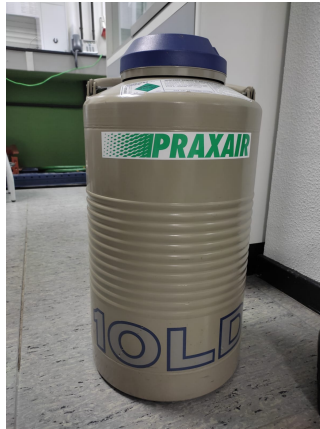


Figura 49: Recipiente Deward en el que se encontraba el nitrógeno.

Para la realización del experimento fue necesaria la compra de otra caja de poliestireno que hiciera de nevera y donde introducir mi sonda y el nitrógeno líquido. Se optó por la mostrada en la

Figura 50, con un volumen interno de 21 L.



Figura 50: Recipiente para la prueba.

Dado que mi experiencia utilizando nitrógeno líquido es nula no sabía muy bien cómo afrontar dicho experimento. A pesar de ser conocedor de que la experiencia de Cristina iba a ser la que nos guiase en el proceso decidí hacer unos cálculos previos que luego se vieron muy alejados de lo ocurrido.

Planteo el problema de la siguiente manera:

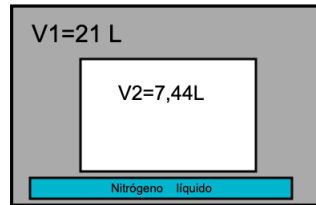


Figura 51: Esquema de la prueba de estrés

Tengo un recipiente supuestamente adiabático de 21 L, en el que introduciré un otro idéntico de 7,44L, el objetivo es que el aire entre ambos esté a una temperatura de -60°C y para ello introduzco un volumen de nitrógeno líquido que quiero calcular.

Igualo los calores del aire en el interior de la caja y del nitrógeno para una temperatura de equilibrio de -60°C obteniendo:

$$|Q_{ABS}| = |Q_{CED}| \quad (24)$$

$$Q_{ABS} = Q_{Liquido} + Q_{CambioEstado} + Q_{Gas} \quad (25)$$

$$m_{aire} \cdot C_{e_{aire}} \cdot (T_{aire} - T_{equi}) = 0 + L_v \cdot m_{N_2} + m_{N_2} \cdot C_{e_{N_2}} \cdot (T_{equi} - T_{N_2}) \quad (26)$$

Donde m se refiere a la masa, C_e al calor específico, T a la temperatura y L_v al calor latente de ebullición del nitrógeno.

Debido al poco trato con el nitrógeno me surgen las dudas sobre cómo hacer este cálculo, conocida la temperatura de ebullición del nitrógeno de -195°C supongo que nunca llega a ser líquido

como tal pues se evapora nada más salir del recipiente anulando el término $Q_{líquido}$ (25). Tengo en cuenta solo los calores del cambio de estado y del propio gas y puedo calcular el volumen necesario para mi temperatura deseada conociendo las siguientes constantes:

$$T_{aire} = 298,15K, \quad T_{equi} = 213,15K, \quad T_{N_2} = 77,35K, \quad L_v = 199 \frac{kJ}{kg}$$

$$C_{e_{aire}} = 1012 \frac{J}{kg \cdot K}, \quad C_{e_{N_2}} = 1012 \frac{J}{kg \cdot K}, \quad m_{aire} = \rho_{aire} \cdot V_{aire}$$

$$m_{aire} = 9 \times 10^{-3} kg$$

Obteniendo:

$$m_{N_2} = \frac{m_{aire} \cdot C_{e_{aire}} \cdot (T_{aire} - T_{equi})}{L_v + C_{e_{N_2}} \cdot (T_{equi} - T_{N_2})} = 5,5 \times 10^{-3} kg \cdot \frac{1L}{0,8085kg} = 6,8 \times 10^{-3} L \quad de \quad N_2 \quad (27)$$

Reitero que al no haber trabajado nunca con nitrógeno líquido, no sabía si este resultado era lógico o no, sin embargo era consciente de que se habían realizado unas aproximaciones un tanto alejadas de la realidad, especialmente considerar los recipientes como adiabáticos.

Como también mencioné antes, Cristina Echevarría Bonet me guía en el proceso y explica que es muy complicado medir no solo la cantidad necesaria si no el propio nitrógeno que se utiliza, por eso mismo es ella la que vierte la cantidad que ve pertinente para nuestro objetivo cerrando posteriormente la nevera exterior y esperando 30 minutos.

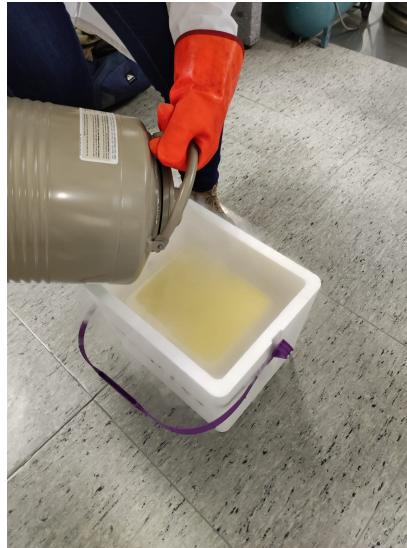


Figura 52: Introducción del nitrógeno líquido en la caja

En ese momento que se muestra en la Figura 52 la caja del interior se encuentra con las cámaras encendidas, con sus respectivas baterías externas cargándolas; los aparatos de medición funcionando, el GPS y las bolsas calentamanos. Resulta una buena simulación del proceso que debemos

llevar a cabo el día del lanzamiento.

Tras 30 minutos se espera que la temperatura mínima ya haya sido alcanzada y se esté calentando poco a poco tras la evaporación de todo el hidrógeno. Aparentemente la caja está prácticamente idéntica al momento de ser introducida, salvo la parte inferior un poco congelada. Retiramos la unión realizada entre tapa y caja, Figura 53, e inmediatamente observamos que tanto cámaras como arduino siguen funcionando.

Posteriormente se comprueba la carga de batería restante, observando que ninguna de las dos cámaras ha llegado a descargar tan si quiera su batería externa. Falta comprobar la toma de datos, el punto de mayor importancia, no solo por saber si fueron registrados sino por conocer la temperatura alcanzada. De no acercarse a una temperatura similar a la esperada o no verse reflejado un gran aislamiento, al comparar los resultados de termómetro interior y exterior, el experimento no se podría calificar de exitoso.

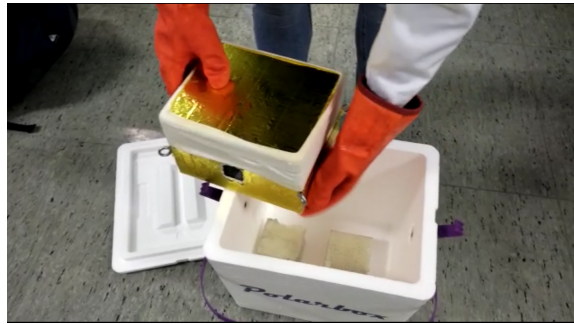


Figura 53: Extracción de la caja

Comprobamos ya en el propio laboratorio la existencia del fichero de datos con un registro de 1291 líneas de datos, en las que se encuentran dos registros de temperatura exterior, uno de temperatura interior, uno de presión y otro de humedad, así como uno de altura relativa al momento de encendido de la placa.

De todos estos datos los que nos interesan realmente son los de las temperaturas, concretamente la relación entre temperatura interior y exterior. También debemos comprobar la diferencia entre termómetros exteriores, esperando observar una mayor calidad en la toma de datos por parte del *DS18B20*, frente al *DHT22* cuya función principal es la de higrómetro.

Comenzamos representando temperatura exterior(*DS18B20*) y temperatura interior frente al tiempo, Figura 54.

Si nos fijamos en la temperatura exterior, observamos dos tramos muy diferenciados, inicialmente vemos una temperatura estable los primeros siete minutos, momento en el que encendemos el arduino y lo procedemos a colocar en la nevera, a partir del minuto 5 comienza la introducción del nitrógeno líquido y en menos de cuatro minutos la temperatura pasa a -35°C . La temperatura mínima alcanzada se da en $-42,2^{\circ}\text{C}$. Mientras tanto en el interior la temperatura aumenta durante los seis primeros minutos, soportando incluso este aumento la entrada del nitrógeno líquido. Confirma esta representación el importante papel que tienen las bolsas calienta-manos. Pasado este periodo el aire del interior de nuestra sonda empieza a enfriarse, muy poco a poco y de manera lineal

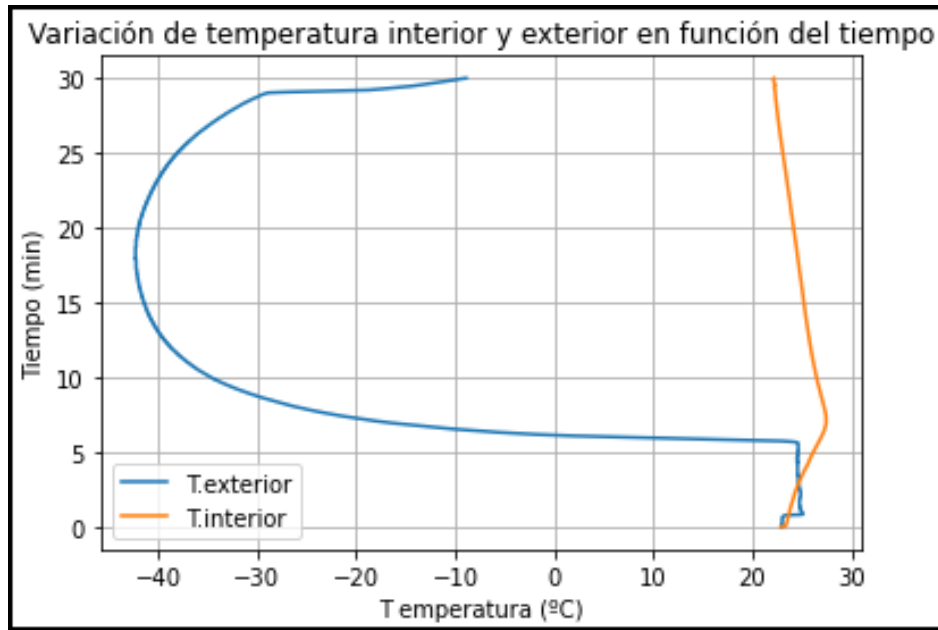


Figura 54: Representación de temperatura interior y exterior frente al tiempo

conservando una temperatura de $24,6^{\circ}\text{C}$.

Al comparar las temperaturas de los dos termómetros interiores observamos la Figura 55.

Observamos que las temperaturas medidas por los termómetros empiezan a separarse a partir de los 7 minutos, cuando la temperatura ronda los -10°C . Siendo conscientes de las limitaciones del *DHT22* frente al *DS18B20* podríamos hablar de una saturación del primero y de una incompetencia a partir de estas temperaturas. Los datos del fabricante aseguran la medición de un rango de temperaturas entre -40°C - 80°C , por lo que se me ocurre que la posición de los termómetros es la responsable de esta diferencia, mientras el *DHT22* se situaba en un lateral de la caja el *DS18B20* se encontraba enfocado hacia el nitrógeno, pudiendo explicarse, en parte, esta diferencia de temperatura.

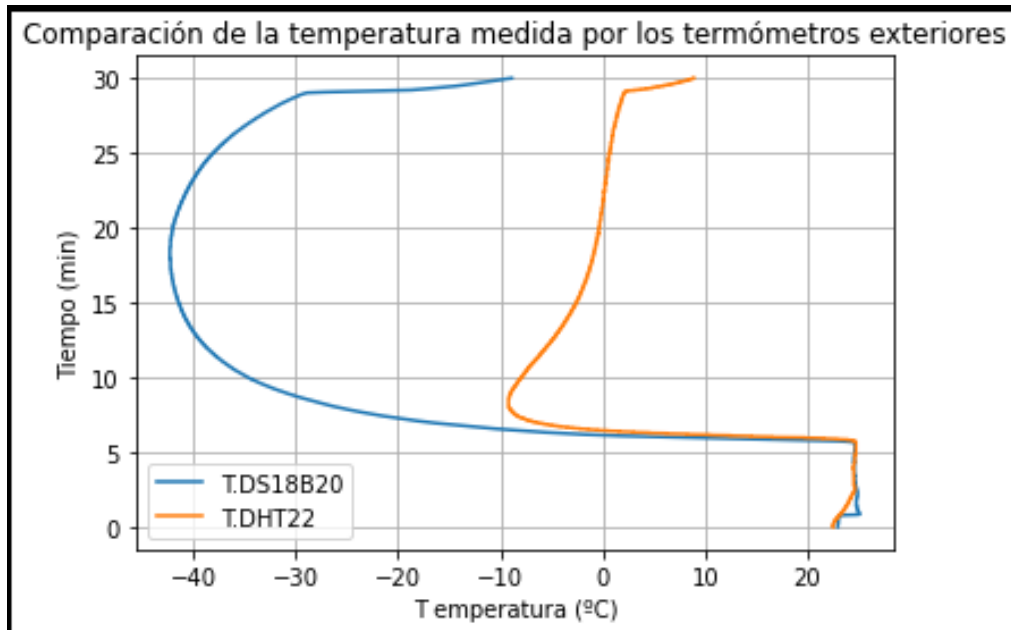


Figura 55: Comparación de la temperatura medida por los termómetros exteriores

Las conclusiones a las que llego son las siguientes:

- El aislamiento de nuestra sonda es muy bueno, llegando a diferencias entre temperatura interior y exterior de $66,8^{\circ}C$.
- El considerar el recipiente exterior como adiabático está muy alejado de la realidad ya que desde el momento de alcanzar la temperatura mínima comienza un aumento pronunciado de esta².
- El nitrógeno líquido ha cumplido con las expectativas y pese a no llegar a la temperatura esperada nos ha permitido alcanzar una cercana de manera rápida.
- Podemos garantizar por la forma de la línea de temperatura interior que de llegar a $-60^{\circ}C$ en el exterior, los dispositivos seguirían a salvo.
- La fiabilidad del *DS18B20* queda demostrada, sin embargo la medición de temperatura del *DHT22*, pese a su colocación, no creo que sea muy fiable, y seguirá con un papel de higrómetro principal y termómetro de reserva en caso de problemas de funcionamiento del principal.

²Mencionar que el último tramos responde a la apertura de la caja.

2.7.2. Prueba de apertura del paracaídas.

La prueba del paracaídas se realiza para asegurarse de un correcto funcionamiento del mismo. Aunque aparentemente no presenta ningún defecto y es de una marca reconocida y comúnmente utilizada, parte del trabajo consiste en comprobar por mis medios si las garantías de los productos se cumplen.

Para unir el paracaídas y la caja se utiliza una cuerda trenzada. Partimos de un nudo en una de las arandelas y se va alternando el paso por la goma del paracaídas y por cada una de las arandelas, volviendo a atarlo en la misma que se hizo el primer nudo.

Tras pensar cual sería la altura ideal para realizar el lanzamiento, llego a la conclusión que la altura no es lo más importante. Se valoró inicialmente lanzarlo desde un séptimo piso, sin embargo supone someter al equipaje a un riesgo innecesario. La función del paracaídas no es reducir la velocidad del descenso mucho, simplemente lo justo para que el aterrizaje no suponga el fin de los dispositivos electrónicos. Lanzarlo desde gran altura serviría para comprobar si se produce la apertura del paracaídas, pero sometiendo a los equipos a un impacto que solo deben soportar el día del sondeo. Lanzarlo desde una altura como un segundo piso también aportaría la información necesaria sobre el paracaídas sin arriesgar demasiado.

El domingo 24 de abril de 2022 se realiza esta prueba, tal y como se muestra en la Figura 72³.



Figura 56: Prueba del paracaídas.

Como se puede apreciar el lanzamiento se realiza desde una altura aproximada de unos ocho metros, rápidamente el paracaídas se abre, reduciendo la velocidad considerablemente pero siendo esta aún así bastante rápida. Esto confirma el planteamiento que dio pie a lanzarlo desde esta altura y a descartar alturas mayores. Podríamos considerar la prueba de exitosa, pues el paracaídas se abrió correctamente y los únicos daños que sufrió la caja fueron unas muescas en la esquina inferior derecha.

³El vídeo de la prueba se puede ver en la página web del proyecto [0]

2.7.3. Prueba de localización.

Para familiarizarme con el uso del dispositivo GPS y comprobar sus limitaciones, se realizará una prueba en la que el dispositivo es escondido en una zona costera del occidente Asturiano y me dispongo a buscarlo sin ser conocedor de la localización de este. La zona en la que el dispositivo se esconde se presenta con cobertura en el mapa ya mencionado [21].

Carmen Suárez González, persona encargada de esconder el dispositivo, parte de Puerto de Vega en la mañana del 1 de mayo de 2022, hacia la reserva natural de Barayo. Una vez allí escoge un sitio donde abandonar el GPS, mientras se monitorizan estos movimiento en la aplicación. Esto se refleja en la Figura 57.

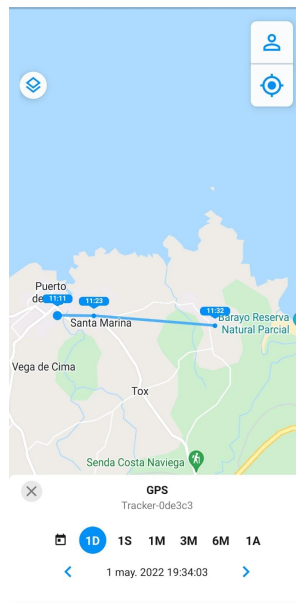


Figura 57: Movimientos reflejados en la aplicación.

Mientras tanto en la aplicación podemos ver tres puntos distintos, el primero a las 11:11, que corresponde al punto de partida; el segundo a las 11:23, de camino a la zona donde se va a esconder el dispositivo y un último a las 11:32, en el aparcamiento donde se dejará el coche y a partir del cual se buscará un sitio para dejar el GPS. Ya ahí se presentan las irregularidades en el periodo temporal de actualización de la ubicación. Pero este no es el mayor problema, la posición del aparcamiento es la última que se recibe. Esta posición no era donde estaba escondido el dispositivo, sin embargo esta no se actualiza en los días que se deja el mismo allí colocado.

La aplicación no comunica ningún error en la detección en las primeras horas, sin embargo, pasado un día, informa de que el GPS se encuentra fuera de cobertura. Esto no viene dado por la zona donde se lleva a cabo la prueba y si por el lugar donde se coloca el localizador.

Con el fin de evitar un posible robo, o que el dispositivo se mojara, se introdujo el localizador en el interior de una tubería de hormigón, que privó de cobertura al mismo. Esto no permite sacar muchas conclusiones y solo deja en evidencia la importancia en el tiempo de actualización de la posición. De saber que esta se actualiza cada 5 minutos, por ejemplo, sabríamos rápidamente que la



Figura 58: Lugar donde se escondió el dispositivo.

posición no se da por un tema de cobertura y el punto a partir del que se pierde con una precisión de cinco minutos de diferencia como máximo.

Con el fin de ahondar en este problema transporte en mi mochila el dispositivo durante aproximadamente un mes, realizando un estudio de la precisión y brevedad en la actualización de la posición. Las conclusiones que obtengo de este estudio se resumen en que la actualización se produce cuando hay un desplazamiento significativo y, en la mayoría de ocasiones, cuando dicho movimiento se detiene. Dicha característica nos podría retrasar a la hora de seguir el globo durante el vuelo, sin embargo no presenta problemas en cuanto a dar información sobre el punto de aterrizaje, ya que, al detenerse el movimiento, debería actualizar la posición.

2.8. Permisos necesarios para el lanzamiento.

Para poder realizar un sondeo de estas características es necesario solicitar un permiso al Departamento de Coordinación Operativa del Espacio Aéreo, de Enaire, una empresa dependiente del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana que se encarga de gestionar el espacio aéreo Español.[23]

Los aspectos que se detallan en esa solicitud se pueden ver en la Figura 59. Lo primero es información personal del solicitante, posteriormente se refleja la naturaleza de la actividad, las fechas y el lugar de lanzamiento. Se concluye con información sobre las dimensiones de la sonda y una declaración de responsabilidad.

ENAIRE recomienda que la solicitud se envíe con la menor antelación posible al día del lanzamiento. Dicha recomendación, la cual de primeras resulta sorprendente, se debe a que deben conocer todo el tráfico aéreo que circulará por la zona del sondeo antes de conceder el permiso. Una gran antelación privaría de información necesaria sobre posibles vuelos y denegaría la solicitud.

Finalmente se envía la solicitud el 13 de Junio, mostrando interés por realizar el sondeo un día entre el 25 de junio y el 8 de julio. El lugar del lanzamiento se detallará más adelante.

Figura 59: Solicitud de actividad aérea civil.

3. Lanzamiento de Carmafly.

3.1. Estudio del lugar de lanzamiento.

El estudio del lugar de lanzamiento es uno de los aspectos más importantes de este proyecto, una buena elección supondrá una respuesta positiva al permiso solicitado y, sobretodo, una fácil recuperación de la carga.

Los aspectos a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo el lanzamiento son los siguientes:

- Orografía del terreno.
- Proximidad a grandes núcleos urbanos.
- Hidrografía de la zona.
- Cobertura Sigfox. *Ver Figura 46*
- Tráfico aéreo.
- Desplazamiento a realizar desde la ciudad de Oviedo.

Descarto Asturias de manera inmediata tanto por la proximidad a la costa como por su relieve montañoso que imposibilitaría la recuperación de la carga. El 60% de los sondeos realizados por AEMET Cantabria, en una comunidad orográficamente similar, caen en el mar Cantábrico y el porcentaje restante, que se desplaza al interior, cae en zonas montañosas de muy difícil acceso. Castilla y León se presenta como la comunidad autónoma con las mejores condiciones para el desarrollo del proyecto, la meseta facilitará el seguimiento y localización del equipo tras el aterrizaje. Se acotará la zona teniendo en cuenta el resto de aspectos hasta llegar a un punto que cumpla lo mejor posible con los requisitos previamente explicados.

El mapa de cobertura 46 no descarta ninguna zona de esta localidad, presentando mucha mejor cobertura a la que estoy acostumbrado en Asturias.

En la figura 60 se observa la zona que valoro antes de tener en cuenta, distancia a núcleos urbanos, tráfico aéreo e hidrografía.

nientes.

Queda estudiar el tráfico aéreo en esa zona, para lo cual utilizo la aplicación Ensignia de ENAIRE[26]. Se observa que la zona acotada hasta ahora ya es bastante buena al tener en cuenta los espacios aéreos de las ciudades anteriormente mencionadas. Solamente el espacio aéreo de León presenta unas limitaciones mayores a las esperadas. Solo cuatro aerovías se encuentran dentro de nuestra zona de estudio, estas serán utilizadas a la hora de dibujar el mapa de la tercera acotación.

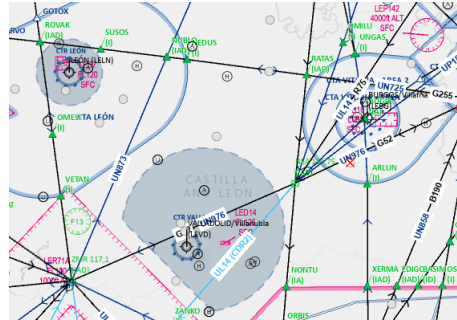


Figura 62: Mapa del tráfico aéreo.[26]

Teniendo en cuenta esta última acotación la mejor localización para el lanzamiento sería la zona suroeste de nuestra figura, buscando un viento nordeste.

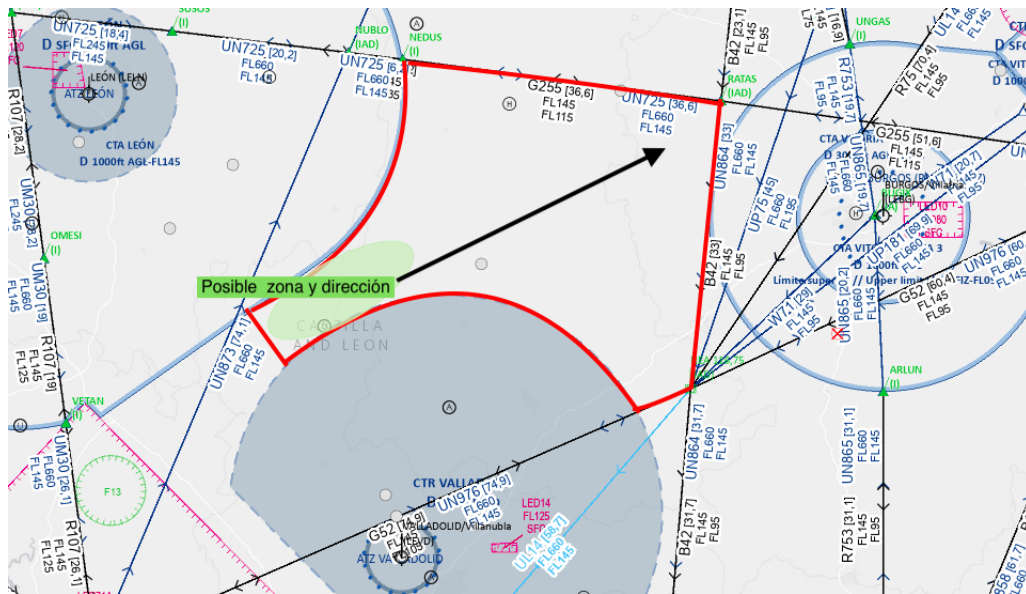


Figura 63: Última acotación y vuelo objetivo, donde la línea roja delimita las zonas que no debemos traspasar y la verde la zona de lanzamiento.

Carlos Fernández Freire coordinador del proyecto Yuri me comparte información sobre su lanza-

miento que tuvo lugar desde el pueblo de Villada, Palencia. Este pueblo se encuentra prácticamente en el centro de mi posible zona (marcada en verde en la Figura 63) y, si bien es verdad, que quizás sería más aconsejable desplazarse un poco más al suroeste, sabemos que se concedió un permiso para ese lugar con anterioridad en un proyecto similar. Es por eso que se solicitará el lanzamiento del proyecto Carmafly para las coordenadas 42.2508,-4.96694.

3.2. Selección del día de lanzamiento.

Para la búsqueda del día de lanzamiento el primer factor limitante es el permiso, este se solicita el 14 de Junio, preguntando por una horquilla para el lanzamiento entre el 22 de junio y el 10 de julio. Enaire responde a la solicitud comunicando que el permiso solo puede incluir fechas a partir del 24 ya que necesitan 10 días de antelación para cualquier solicitud.

Sabiendo esto comienza una búsqueda de las mejores condiciones climatológicas para el lanzamiento, se utilizan simuladores y predicciones meteorológicas para buscar una fecha lo más cercana posible al 24 de junio, donde en principio comenzaría mi permiso. La época del año es perfecta en cuanto a estabilidad y horas de luz.

El 28 de Junio se va poco a poco perfilando como el día elegido, respaldado por los simuladores de los que hablaremos después, pero el permiso a día 26 aún no había llegado. Desde el día 24 me pongo en contacto con Enaire todos los días para solicitar información a la tardanza del permiso sin obtener una respuesta clara. El día 27 explico definitivamente a un responsable el motivo de mi permiso, la necesidad imperiosa de tenerlo para el día siguiente y sobre todo, el detallado estudio realizado en lo referente a tráfico aéreo. Dicha conversación deriva en un correo electrónico que me comunica que tengo autorización para realizar el lanzamiento respetando los condicionantes expuestos en mi estudio.

3.2.1. Uso de los simuladores.

Para la selección del día del lanzamiento el simulador más utilizado fue el CUSF Landing Predictor 2.5 [27] una herramienta diseñada por la Universidad de Cambridge que, utilizando datos de los modelos NOAA GFS, predice el tiempo de vuelo y el lugar de aterrizaje de un globo meteorológico lanzado en una posición dada.

The image shows a web-based interface for the CUSF Landing Predictor 2.5. The interface is overlaid on a map of the region around Villada, Palencia. The parameters are as follows:

- Launch Site: Custom (dropdown menu set to Churchill)
- Latitude/Longitude: 52.2135 / 0.0964
- Set With Map: (button)
- Save Location: (button)
- Launch altitude (m): 0
- Launch Time (UTC): 09 : 37
- Launch Date: 01 Jul 2022
- Ascent Rate (m/s): 5
- Burst Altitude (m): 30000
- Use Burst Calculator: (checkbox)
- Descent Rate (m/s): 5
- Run Prediction: (button)

Figura 64: Parámetros a introducir [27]

La información que solicita el simulador consiste en lugar, día y hora de lanzamiento, la altura inicial a la que se realizará y la altura a la que explotará el globo. Para este último valor el simulador incluye una calculadora del mismo en función de la marca y volumen del globo, en nuestro caso esto ya ha sido calculado.

Las simulaciones se pueden realizar 180 horas antes del lanzamiento y desde el día 16 de Junio se comienza a buscar la fecha que mejor encaja con el estudio realizado.

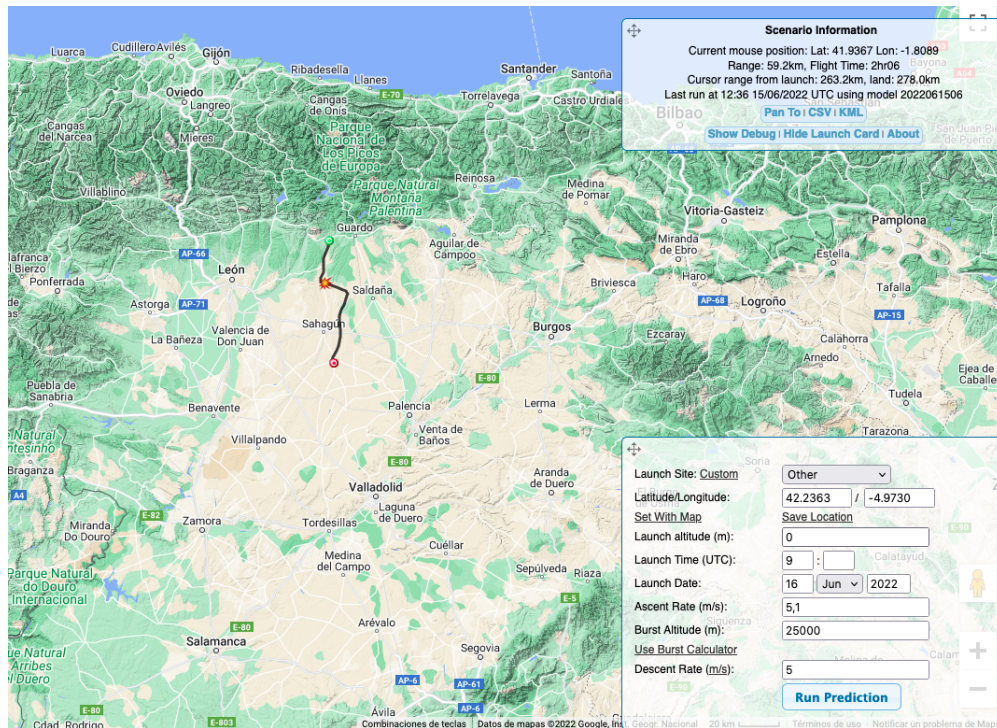


Figura 65: Ejemplo 16 de junio[27]

El aspecto del simulador es el mostrado en la Figura 65, que para este día nos indica que el globo se desplazaría 60 km aterrizando cerca del Parque Natural Montaña Palentina.

En el estudio realizado se observa que las predicciones del simulador a cinco días no cambian mucho con respecto a un día, esto quiere decir que podríamos fiarnos del mismo con cierta anterioridad para preparar el viaje, ya que de un día para otro no esperamos un gran cambio.

La relevancia de este simulador en la selección de la fecha del lanzamiento, consolidándose como único dictador de la misma, viene de entender que cualquier estudio que yo pueda realizar o parámetro que quiera incluir, ya se tiene en cuenta en el mismo. Solo podría intentar que se traste de un día despejado por la visibilidad de las cámaras, pero, además de que primo un pequeño desplazamiento sobre la calidad del vídeo, estas dos condiciones suelen darse juntas.

Este proceso desemboca en la elección del día 28 de Junio como fecha de lanzamiento mostrando una simulación expuesta en la Figura 66, donde el aterrizaje se daría a solamente 38.6 km del punto

de lanzamiento, en una zona rural sin gran peligro para la sonda. Unas condiciones inmejorables.

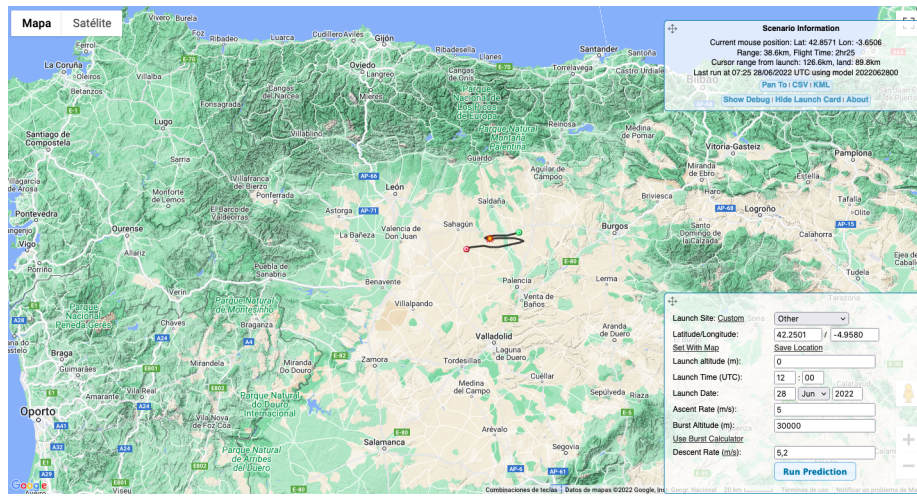


Figura 66: Selección de 28 de junio [27]

También se ha utilizado un simulador que nos proporciona la página *Meteorix* [28], el cual nos permite observar un perfil vertical sintético según el modelo ECMWF IFS HRES en el lugar y fecha a elegir. Inicialmente se pensó en utilizar para elegir la fecha de lanzamiento, pero como ya mencioné el CUSF tiene en cuenta todos estos parámetros y nos da una simulación fiable, lejos de posibles errores humanos en la interpretación. De todas formas, se utilizará esta página para generar un perfil vertical sintético para el 28 de Junio y comparar con los datos que proporcionen nuestra sonda.

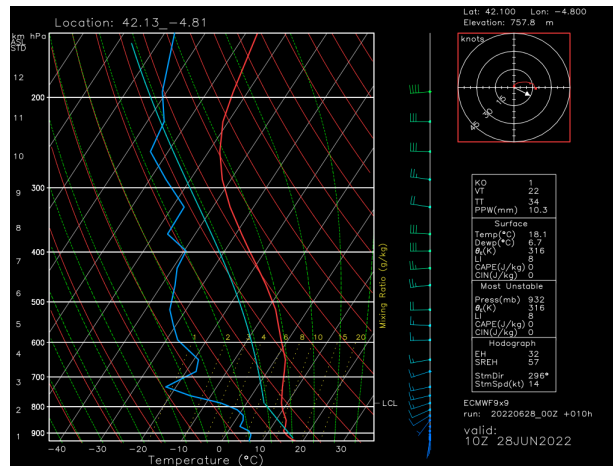


Figura 67: Perfil vertical sintético 28 de junio [28]

3.3. Proceso de lanzamiento.

El día 28 de Junio partimos de Asturias en dirección a la Ermita de la Virgen del Río en Villada, una localización alejada del centro del pueblo y donde podríamos extender nuestro equipo sin ningún problema.



Figura 68: Ermita de la Virgen del Río

El día confirmó las condiciones pronosticadas, presentando un muy ligero viento de superficie y un cielo despejado que permitiría a las cámaras grabar el vuelo con todo lujo de detalles. Sobre las diez comenzamos con la preparación del lugar de lanzamiento, extendiendo una lona de plástico sobre el suelo y repartiendo guantes de látex entre los colaboradores, con el fin de evitar que el globo fuese rasgado.

Tras extender la lona, colocamos la bombona de helio en posición vertical y sacamos la caja portadora con el paracaídas ya atado a la misma.



Figura 69: Preparación del terreno de lanzamiento.

El plan en este momento era comenzar con el llenado del globo hasta alcanzar el perímetro deseado, que fue finalmente 4,72 m, dado según las condiciones de temperatura y el objetivo de alcanzar los 30 km de altura, una meta consecuente a las buenas condiciones dadas.

A las 10:23 horas comienza el llenado del globo asegurando el mismo con una brida a la manguera de la bombona como se puede observar en la Figura 70.



Figura 70: Comienzo de llenado del globo.

Durante este proceso se hizo uso de una cinta métrica para buscar el perímetro mencionado, llegando al mismo a las 10:47 horas.



Figura 71: Alcanzamos perímetro buscado.

El proceso que venía a continuación era el cerrado de la boquilla del globo, para este proceso seguimos un cuidadoso proceso. Se colocarían dos bridas, una en la zona superior de la boquilla del globo y otra en la zona inferior, cortando el sobrante de cada una de ellas y envolviéndolas con cinta americana para evitar cualquier daño en el látex. Entre estos dos puntos se realiza la unión globo-paracaídas haciendo uso de la cuerda que ya incluye este elemento. Una vez realizada dicha unión con tantos nudos como fuesen necesarios plegaríamos la boquilla, uniendo los dos puntos mencionados y asegurando dicho doblez con otra brida y su correspondiente cinta americana.

Durante este proceso se comienza con la preparación de la electrónica, encendiendo ambas cámaras ya conectadas a su batería portátil y colocándolas en sus respectivos huecos. También alimentamos el arduino con una pila y en ese momento comienza la toma de datos. Introducimos también el GPS y las bolsas calienta-manos y cerramos la caja asegurando la unión con la tapa de la misma con cinta americana. Es importante mencionar que en la caja se colocan carteles que informan de la importancia del proyecto y dejan tres teléfonos de contacto por si alguna persona ajena al mismo lo encuentra.

A las 11:04 horas, la preparación había concluido y estábamos listos para que el despegue tuviese lugar.



Figura 72: Despegue proyecto CARMAFLY.

El lanzamiento del proyecto CARMAFLY tiene lugar el 28 de Junio de 2022 a las 11:06 de la mañana, con la certeza de haber hecho todo lo que esta en mi mano para conseguir un sondeo vertical por mis propios medios y una grabación de nuestro planeta desde un punto privilegiado. Sería el azar el que a partir de este momento determinaría el éxito o fracaso de mi misión.

El despegue fue un éxito, y el globo ascendió con la velocidad y dirección pronosticada. A la vez que CARMAFLY, se lanzaron globos publicitarios de nuestro patrocinador ESTELA CENTRO DEPORTIVO [32] y mientras a estos el viento les afecto nuestra sonda ascendió prácticamente en la vertical los primeros metros, hasta ser perdida de vista tras los primeros 10 minutos de vuelo.



Figura 73: Equipo participante en el lanzamiento.

3.4. Recuperación del equipo.

Una vez lanzado el globo comienza el periodo de recuperación, para ello debemos tener en cuenta que se espera un vuelo de 2 horas y 25 minutos y un aterrizaje en la zona de San Mamés de Campos, pronosticada por el simulador.



Figura 74: Pronostico de zona de aterrizaje según el simulador.[27]

Con el fin de ir acercándonos al punto de aterrizaje nos desplazamos al pueblo de San Mamés de Campos a esperar una actualización del GPS. Según el estudio que se ha realizado al mismo, este debería actualizar su posición unos minutos después del aterrizaje, al detectar la detención del movimiento que se estaba realizando.

Llegada la hora pronosticada de aterrizaje, el GPS aún no había actualizado su posición y tampoco lo haría en las horas siguientes. A las 15:00 horas la aplicación de Invoxia notificaba que el dispositivo se encontraba sin batería o en una zona sin cobertura. Siendo conscientes de que lo primero era imposible empezábamos a hacernos a la idea de que el sistema de localización había fallado. Un sistema de localización que había transmitido correctamente la posición durante meses y nunca había perdido la cobertura en condiciones normales (solo mostró el mensaje de error en cobertura cuando se colocó dentro de una tubería de hormigón) había fallado el día que no podía fallar. A medida que pasaban las horas era cada vez más improbable que este dispositivo actualizase la posición de la caja.

Durante este periodo buscamos por la zona pronosticada, que correspondía a campos de trigo en los que encontrar mi equipo era equivalente a encontrar una aguja en un pajar. Cualquier pequeña incertidumbre en el simulador podía alejarnos del lugar de aterrizaje kilómetros, haciendo muy improbable localizar la carga sin datos del GPS.



Figura 75: Zona de búsqueda.

Tras no recibir datos por parte del GPS llegadas las 18:00 emprendemos nuestro viaje de vuelta, no sin antes dirigirnos al cuartelillo de la Guardia Civil de Saldaña. Allí informamos sobre nuestro proyecto y dejamos nuestros datos por si se da el caso de que alguien encuentre la carga y lo notifique sin llamar a los teléfonos expuestos en la caja.

Nos vamos con la impotencia de no saber que habrá podido pasar y con la gran tristeza de no haber cumplido el objetivo.

Con el fin de intentar obtener una explicación escribo a la empresa Invoxia, exponiendo el caso y preguntando por todos los datos posibles referentes a mi GPS. Se me comunica que el dispositivo envió señales vacías desde las 13:36 horas, hora que encajaría perfectamente con el aterrizaje y confirmando un correcto funcionamiento del GPS cuyo problema viene dado únicamente por la cobertura.

A día 8 de julio de 2022 la única esperanza de recuperar mi equipo es que alguien lo encuentre y se ponga en contacto conmigo.

4. Conclusiones.

Durante el desarrollo del proyecto CARMAFLY esperaba que esta parte fuese la más completa y detallada, esperaba tener unos valores e imágenes que me permitiesen hacer un estudio propio de nuestra atmósfera, sin embargo era consciente de que cualquier contratiempo podría privarme de estos resultados.

Inicialmente, y con la frustración de no haber conseguido los resultados, catalogo este proyecto como un fracaso dejándome llevar por la impotencia de que un factor prácticamente incontrolable había dictado sentencia.

Tras reflexionar los días posteriores al lanzamiento, la reflexión cambia drásticamente llegando a la conclusión de que el aprendizaje que me ha aportado este proyecto reside más en la preparación del mismo y la experiencia adquirida que en los resultados que podría obtener.

Si bien es cierto que el fin de cualquier científico es obtener unos resultados que justifiquen su trabajo, en este proyecto me he adentrado en el mundo de la ciencia experimental haciéndome una idea de las dificultades que esta presenta. He aplicado conocimientos de prácticamente todos los campos estudiados en la carrera, desde pinceladas de astrofísica hasta termodinámica, pasando por aprender nuevos lenguajes de programación, estudios orográficos, perdiciones meteorológicas, mucha electrónica...

Además de todo eso he sufrido la barrera económica existente en la ciencia experimental, aprendiendo a desenvolverme en cierta medida en el mundo empresarial, buscando patrocinadores y colaboradores que quisiesen apostar por un trabajo de estas características y siendo consciente de las dificultades que esto presentaba.

El no recuperar la carga me priva de un estudio exhaustivo y de sacar muchas conclusiones que ahora ni imagino, pero el haberla perdido, me sirve para desarrollar un profundo respeto a todas aquellas personas cuyo proyecto no obtuvo los frutos esperados en un determinado momento, pero que su trabajo y vocación inspiró a muchos otros y los motivó a conseguir sus objetivos.

5. Bibliografía

Referencias

- [1] GÓMEZ-CABALLERO, J. ARTURO, AND JERJES PANTOJA-ALOR., *El Origen de La Vida Desde Un Punto de Vista Geológico.*, vol. 56, no. 1, Sociedad Geológica Mexicana Instituto de Geología UNAM, 2003, pp. 56–86
- [2] CHARLES FRANKEL, *Volcanes del sistema solar*, Cambridge University Press, 1996, p. 7-8, ISBN 0-521-47770-0.
- [3] GONZÁLEZ-NUEVO, JOAQUÍN, *Apuntes de la asignatura Física de la Atmósfera.*
- [4] CORTÉS ROSSELL, LISSETTE ALEJANDRA, *Validación de los perfiles verticales de tres modelos meteorológicos utilizando las radiosondas de antofagasta, paranal y llano de Chajnantor*

Páginas web

- [5] [http : //www.castello.es/archivos/560/Origen_y_Evolucion_del_Universo.pdf](http://www.castello.es/archivos/560/Origen_y_Evolucion_del_Universo.pdf) visitada por última vez el 26/04/22.
- [6] [https : //magickabab.com/society/20518.html](https://magickabab.com/society/20518.html) visitada por última vez el 26/04/22.
- [7] [https : //es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_gran_impacto](https://es.wikipedia.org/wiki/Teor%C3%ADa_del_gran_impacto) visitada por última vez el 26/04/22.
- [8] [https : //es.wikipedia.org/wiki/Gran_oxidaci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Gran_oxidaci%C3%B3n) visitada por última vez el 26/04/22.
- [9] [https : //es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera](https://es.wikipedia.org/wiki/Atm%C3%B3sfera) visitada por última vez el 26/04/22
- [10] [https : //www.caracteristicas.co/atmosfera/](https://www.caracteristicas.co/atmosfera/) visitada por última vez el 26/04/22
- [11] [https : //www.imn.ac.cr/documents/10179/27818/Comp-atmosfera.pdf/996a94d5-ec7c-478f-91ec-d465d8cab5f8](https://www.imn.ac.cr/documents/10179/27818/Comp-atmosfera.pdf/996a94d5-ec7c-478f-91ec-d465d8cab5f8) visitada por última vez el 26/04/22
- [12] [http : //www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/calor/atmosfera/atmosfera.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/calor/atmosfera/atmosfera.html) visitada por última vez el 27/4/22
- [13] [https : //www.meted.ucar.edu/glossaries/mesogloss.es.htm](https://www.meted.ucar.edu/glossaries/mesogloss.es.htm) visitada por última vez el 27/4/22
- [14] [https : //www.youtube.com/watch?v=1y4CM4FaHeg](https://www.youtube.com/watch?v=1y4CM4FaHeg) visto por última vez el 5/4/22
- [15] [http : //radiosonde.eu/RS00-S/RS02K-S.html](http://radiosonde.eu/RS00-S/RS02K-S.html) visto por última vez el 12/4/22
- [16] [https : //nanobiomem.grupos.uniovi.es/](https://nanobiomem.grupos.uniovi.es/) visto por última vez el 13/6/22
- [17] [https : //www.meted.ucar.edu/index.php](https://www.meted.ucar.edu/index.php) curso sobre predicción meteorológica, ultima vez visitado 15/4/22
- [18] [https : //www.luisllamas.es/](https://www.luisllamas.es/) visto por última vez el 12/10/21
- [19] [https : //www.fotoruanopro.com/](https://www.fotoruanopro.com/) visitada por última vez el 3/5/22
- [20] [http : //www.aemet.es/es/portada](http://www.aemet.es/es/portada)

[21] <https://www.sigfox.com> última vez visitada el 3/5/22

[22] <https://www.invoxia.com/es>

[23] <https://www.enaire.es>

[24] <https://www.calcmaps.com/es/map-radius/> visitada por última vez el 15/6/22

[25] <https://www.google.com/maps>

[26] <https://insignia.enaire.es>

Simuladores.

[27] <https://predict.habhub.org/>

[28] <https://meteologi.x.com>

Proyectos similares y colaboradores.

[29] CANDASAT I: LANZAMIENTO DE UNA SONDA A LA ESTRATOSFERA.

[30] PROYECTO YURI

[31] CHASAT: SONDAS METEOROLÓGICAS CASERAS

[32] ESTELA CENTRO DEPORTIVO <https://www.estelacentrodeportivo.es/>

Página web del proyecto

<https://sites.google.com/view/carmafly/inicio?authuser=0>