



COLEGIO LUIS AMIGÓ

Ctra. Tajonar, Km. 2
31192 MUTILVA
Telf. 948 23 68 50



La bomba biológica, el pulmón verde del planeta

AUTORA | Marta Fernández Pérez y Pablo Javier Poveda García

TUTOR | Javier Elizalde Razquin

CENTRO | Colegio Luis Amigó

CURSO ACADÉMICO | 2021/2022

ÍNDICE

1. Resumen/Abstract	3
2. Introducción	4
3. Antecedentes	4
4. Hipótesis y objetivos	5
5. Materiales y métodos	5
6. Resultados	7
7. Conclusiones	8
8. Agradecimientos	8
9. Bibliografía y webgrafía	9
10. Anexo de figuras	10
11. Anexo de tablas	16

RESUMEN

A partir de la creación de la máquina de vapor comenzó lo que actualmente se conoce como calentamiento global. Las emisiones de CO₂ a la atmósfera aumentan considerablemente todos los años, generando así problemas globales. Sin embargo, existen organismos en la Tierra que transforman el CO₂ en oxígeno de manera natural, como es el caso de las diatomeas. Así mismo, los avances tecnológicos han dado lugar a la creación de las CCUS, unas tecnologías que capturan el CO₂ de la atmósfera. Es por ello que uniendo estos dos conceptos se plantea la creación de una bomba biológica artificial en la que se ha estudiado si las algas del río son capaces de transformar el CO₂ capturado de la atmósfera en O₂. Para ello se ha creado un banco de ensayo experimental utilizado una pecera y las tecnologías de *Arduino*, con las que se hizo el seguimiento durante 33 días de la temperatura, presión, humedad, oxígeno y dióxido de carbono asociados al cultivo de algas. Los objetivos principales del proyecto han girado en torno a la construcción del banco de ensayo experimental, que sea económico, la realización de posterior cultivo de algas y conseguir hacer el seguimiento de los parámetros.

ABSTRACT

Global warming began with the creation of the steam engine. Carbon dioxide emissions have been consistently increasing in the last years, causing global issues. Nevertheless, the Earth has natural organisms that transform the CO₂ into O₂, such is the case of diatoms. Likewise, new technological progresses have given rise to the CCUS, which are technologies that capture de CO₂ from the atmosphere. The combination of these two concepts therefore poses the creation of an artificial biological bomb which permits us to study how the algae of the river are able to transform the CO₂ captured from the atmosphere into O₂. For this reason, an experimental test bench was created by using a fish tank and Arduino technologies. These were used to keep track of the temperature, pressure, humidity, oxygen, and carbon dioxide associated to the seaweed cultivation during 33 days. The main goals of the project are building an economical experimental test bench, growing subsequent seaweed, and managing to keep track of the parameters.

INTRODUCCIÓN

Como todo el mundo sabe, a partir de la utilización de la máquina de vapor en la Primera Revolución Industrial (desde finales del siglo XVIII), puede hablarse del inicio del proceso de contaminación y calentamiento global en el planeta Tierra. Dos problemas provocados por la combustión del carbón utilizado para hacer funcionar esas primeras máquinas.

A lo largo de los años, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) han ido aumentando considerablemente y las consecuencias de este incremento son cada vez más tangibles en el día a día. Así, para frenar el avance del calentamiento global se han establecido numerosos objetivos y acuerdos a nivel internacional. Uno de ellos es el Objetivo de Desarrollo Sostenible número 13, *Acción por el clima*, que busca mitigar los niveles de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero en la atmósfera (ONU, s.f.).

Sin embargo, la naturaleza ya ofrece soluciones a este problema. Muchos seres vivos transforman de manera natural el CO₂ en oxígeno (O₂). Este es el caso de las diatomeas, un grupo de algas unicelulares que constituyen uno de los tipos más comunes de fitoplancton. Estas, mediante la fotosíntesis, utilizan la energía procedente del sol para convertir el CO₂ en carbono orgánico (C). Una parte de este C se hunde por gravedad y pasa a formar parte de las rocas, disminuyendo los niveles de CO₂ atmosférico de forma natural. Este proceso es denominado “bomba biológica” (Cermeño, 2020).

Así mismo, la ciencia ha ideado y desarrollado numerosos métodos y formas de reducir estas emisiones de CO₂ a la atmósfera. Algunas de las soluciones que se plantean son fomentar el uso de energías renovables, como la solar, eólica o hidroeléctrica o apostar por el uso y la captura de carbono (CCUS).

Por todo esto, la motivación para realizar este proyecto de investigación se basa en poder encontrar una forma de ayudar a mitigar el cambio climático de una manera innovadora, económica y útil para la sociedad.

ANTECEDENTES

El estudio de métodos para reducir la contaminación por CO₂ se está analizando constantemente. De hecho, la fotosíntesis es una parte clave de esta transformación. Así, es un tema que ha dado lugar a numerosas investigaciones. Últimamente, se ha hablado mucho sobre la posibilidad de encontrar la forma de realizar la fotosíntesis de manera artificial.

En referencia a las tecnologías más novedosas en relación con este tema, cabe destacar las CCUS (por sus siglas en inglés *Carbon Capture Use and Storage*), las cuales quedan definidas bajo un conjunto de procesos tecnológicos con el propósito de reducir las emisiones de carbono en la atmósfera. Es un proceso tecnológico artificial mediante el cual se retira el CO₂ del aire y se convierte en materiales aprovechables o se almacena en el subsuelo de manera segura y permanente. Estas tecnologías tienen como objetivo reequipar las actuales centrales eléctricas para que retiren el dióxido de carbono, reducir las emisiones de las industrias que no pueden funcionar con energías renovables, extraer carbono directamente del aire, además de reducir el carbono generado por la industria pesada (Freeman y Yellen, 2019).

El estudio de la fotosíntesis artificial ha sido tratado en trabajos fin de carrera, grado, máster o tesis doctorales. Un ejemplo es el trabajo titulado *Captura de CO₂ mediante algas unicelulares*, presentado en 2010 por M^a José García Vicente, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid. En él se llevó a cabo un cultivo de *Nannochloropsis gaditana* en un biorreactor al que se le inyectaron concentraciones de CO₂ para medir la cantidad de esta sustancia que esta especie de alga puede capturar, así como la biomasa producida y la concentración de clorofila por espectrofotometría.

Por último, muy recientemente, investigadores del CSIC y de la Universidad de Sevilla han descubierto un mecanismo para retirar el CO₂ atmosférico utilizando microalgas. En el artículo se estudia la mejora de la síntesis de aminoácidos en cultivos de *Chlamydomonas*, favoreciendo la activación de TOR (*target of rapamycin*) y, en consecuencia, la transformación del CO₂ en O₂ (Mallén-Ponce, Pérez-Pérez y Crespo, 2022).

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Como se ha mencionado previamente, las CCUS están enfocadas en la captura de las emisiones de CO₂ provenientes de las grandes industrias contaminantes. Además, sabemos que la bomba biológica, mediante los organismos fotosintéticos del océano, constituye una forma natural de transformar el CO₂ depositado en el ambiente.

Tras el análisis realizado, la hipótesis planteada es la siguiente: ¿sería posible desarrollar una bomba biológica “artificial” y económica con la que poder transformar el CO₂ capturado de la atmósfera en oxígeno?

Por ello, los objetivos de esta investigación son:

- Construir un prototipo de banco de ensayo experimental a escala reducida, con el fin de analizar y valorar la viabilidad técnica de este concepto de bomba biológica “artificial”.
- Conseguir que el prototipo sea económico y fácil de utilizar, para hacerlo accesible al mayor número de personas posible y, así, aportar una nueva forma de transformación del CO₂.
- Conseguir realizar un cultivo de algas para su posterior seguimiento y estudio.
- Hacer un seguimiento de los distintos parámetros en el prototipo a lo largo del tiempo: temperatura (dentro y fuera del agua), presión, concentración de CO₂ y O₂, humedad y pH del agua.

MATERIAL Y MÉTODOS

Primero de todo, para la realización de la bomba biológica “artificial” se ha diseñado un prototipo 3D de lo que sería el banco de ensayo (imagen 1 del anexo). En él se puede observar que hay un depósito (01) para contener el fluido de estudio (02), formado por fitoplancton y agua. Alrededor del depósito se pueden ver los diferentes elementos que se han considerado necesarios inicialmente:

- **Depósito estanco (01):** de 2 m x 1 m x 1 m (2 m³). Fabricado un material transparente, con el fin de que el contenido se vea con claridad y las algas puedan captar la luz solar y realizar la fotosíntesis. Preferiblemente de vidrio, para así evitar la formación de agentes contaminantes.
- **Fluido de estudio (02):** compuesto por una mezcla de fitoplancton, en una proporción de 70%. El agua puede ser dulce o salada. Si el agua es salada, la salinidad debe encontrarse entre los 0 y los 37 g/L. Sin embargo, el agua tiene que estar previamente esterilizada.
- **Calentador/resistencia (03):** para mantener la temperatura del agua entre los 15 y 22 °C (dependiendo de la especie), temperatura óptima en la que vive el fitoplancton. La resistencia será de 150 W y estará conectada al ordenador central. En él, la resistencia estará programada para que, cuando la temperatura del agua llegue a los grados establecidos, deje de funcionar (lazo de control).
- **Sensor de temperatura del agua (04):** con el fin de mantener controlada la temperatura del agua y así proporcionar las condiciones óptimas para el posible desarrollo de vida del fitoplancton.
- **Sensor pH (05):** con el fin de mantener controlada la acidez del agua entre 7 y 9.
- **Ventana de acceso de alimentación de fitoplancton (06):** directamente conectada con el agua mediante un tubo y con una tapa para que el aire no salga al exterior y el aire del ambiente no entre al depósito e interfiera en el ambiente del depósito.
- **Sensor de presión de ambiente (07):** para controlar la presión del depósito.
- **Sensor de temperatura ambiente (08):** para controlar la temperatura fuera del agua.
- **Sistema de circulación del agua (09):** para evitar que el agua se estanque y se creen organismos no deseados. Además, es imprescindible un buen movimiento del agua ya que, de no tenerlo, el intercambio de CO₂ por O₂ sería imposible.
- **Sistema de medición de O₂ (10):** para controlar la concentración de O₂ del depósito.

- **Drenaje (11):** como fuente de salida del fluido.
- **Sistema de medición del CO₂ (12):** con el fin de tener controladas en todo momento las cantidades de CO₂ en el ambiente del depósito.
- **Sistema de iluminación (13):** para permitir que el fitoplancton pueda hacer la fotosíntesis se necesita una fuente de luz, bien sea natural o artificial.

Tras la fase de diseño, se ha continuado con el desarrollo y construcción del prototipo real de bomba biológica “artificial”. Para su realización se ha decidido utilizar principalmente la tecnología de *Arduino*, un sistema de placas electrónicas que se programan desde el ordenador, con sensores, luces, motores, etc. Los componentes utilizados para la construcción del prototipo real (imagen 2 del anexo) han sido:

- **Depósito estanco:** se ha utilizado una pecera de vidrio de 11 L de capacidad, de la marca *Radys* (Amazon, 2021).
- **Fluido de estudio:** una muestra de agua del río Arga, situado en Navarra, a su paso por la ciudad de Pamplona en tres puntos distintos: antes de su llegada a la ciudad, en Olloki (42° 50' 00.1" N - 1° 35' 12.0" W), donde el río es estrecho y la corriente fuerte; a su paso por la ciudad de Pamplona, en las pasarelas junto al Club Natación Pamplona (42° 49' 05.8" N - 1° 38' 10.4" W), donde el río es más ancho y la corriente está ya más calmada; y a la salida de la ciudad, después de la depuradora, en Ororbia (42° 48' 51.5" N - 1° 44' 55.2" W), donde el río es un poco más estrecho y la corriente tranquila. Se ha recogido agua de los tres puntos con algas y piedras en botes de cristal para después cultivarlas en casa (wikiHow, s.f.).
- **Sensor de temperatura del agua:** se ha usado un termómetro digital con pantalla LCD sumergible pensado para peceras, con un rango de temperaturas de -50 °C a 70 °C, modelo 80348 del fabricante *Gamefox* (Amazon, 2021).
- **Sensor de presión de ambiente:** se ha medido con un sensor de presión de *Arduino* modelo BMP-180 (GY-68) (Naylamp Mechatronics SA, 2021).
- **Sensor de humedad y temperatura ambiente:** para mantener controlados estos dos parámetros se ha utilizado el modelo de sensor de *Arduino* DHT-11 (Del Valle-Hernández, s.f.).
- **Sistema de circulación del agua:** para construirlo se ha usado una bomba de agua, conectada a un relé KY-19. (Agricultura Electrónica, 2019).
- **Sistema de medición del CO₂:** se ha medido con el sensor de *Arduino* modelo MH-Z19 (Prometec, s.f.).
- **Sistema de medición de O₂:** se ha utilizado el modelo de sensor de *Arduino* KE-25. (anon., 2020).

Todos estos elementos se han conectado a una placa de *Arduino MEGA 2560 R3*, excepto la bomba de agua y el relé que se han conectado a una placa de *Arduino UNO* (imagen 3 del anexo de figuras y tabla 1 del anexo de tablas). Para visualizar los datos de los sensores, se ha conectado una pantalla LCD 20x4 y el sistema también necesita una placa *board* para unir todas las conexiones y 4 portapilas para conectar 4 pilas de 9 V. La ventaja que tiene realizar este proyecto utilizando las herramientas de *Arduino* es que se tienen todos los elementos perfectamente monitorizados y controlados mediante un ordenador, en este caso solo hacen falta 2 portapilas conectados a 2 pilas de 9 V para alimentar la bomba y el sensor de O₂ porque el resto de componentes y las placas reciben la energía del propio ordenador. Cada componente cuenta con su propia programación que ha sido modificada y adaptada según las necesidades del proyecto y que puede ser descargada en el siguiente enlace: <https://bit.ly/3GoDHwI>.

Se ha realizado el experimento de dos fases: en la primera, se realiza el cultivo de fitoplancton en un depósito diferente al principal y manteniendo las condiciones que requiere dicho cultivo para poder crecer y desarrollarse correctamente durante 15 días, a 21-22 °C y con presencia de luz solar; en la segunda fase se transfiere el cultivo al depósito estanco (en este caso una mezcla de aguas de Pamplona y Ororbia, ya que las algas de Olloki no han llegado a desarrollarse) y, una vez en él, se toman los datos de los sensores tres veces al día. La primera medición, ha tenido lugar a primera hora de la mañana, entre las 7:30 y las 8:00 horas; la segunda medición ha sido entre las 14:30 y las

15:00 horas; y la tercera a última hora del día, entre las 21:30 y las 22:00 horas. Para tomar las medidas se conectan las pilas, dejando funcionar los sensores durante 15 minutos, y se anotan los valores de la pantalla LDC.

RESULTADOS

Primero de todo, se ha podido realizar un prototipo de banco de ensayo experimental que consta de una pecera de cristal cuyas dimensiones son de 30 cm de largo x 18 cm de ancho x 20 cm de alto, y en la que entra un volumen real de agua de 10.800 cm³. La pecera está sensorizada con diferentes elementos de *Arduino* que miden, en tiempo real, distintos parámetros. Todo esto puede verse en la imagen 2 del anexo. Estos sensores se encuentran controlados y conectados a dos placas, una placa *Arduino MEGA 2560 R3* y otra placa *Arduino UNO*. Los sensores utilizados y sus puertos de conexión son los siguientes: el sensor de humedad y temperatura (DHT-11), conectado al puerto 3 de la placa *Arduino MEGA 2560 R3*; el sensor de presión (BMP-180 o GY-68), conectado a los puertos SDA20 y SCL21 de la placa *Arduino MEGA 2560 R3*; el sensor de CO₂ (MH-Z19), conectado a los puertos TX118 y RX119 de la placa *Arduino MEGA 2560 R3*, y el sensor de O₂ (KE-25), conectado al puerto A0 de la placa *Arduino MEGA 2560 R3*. Además, se ha utilizado un termómetro acuático digital para medir la temperatura del agua de la pecera. Una bomba de agua conectada a la placa *Arduino UNO* a través de un relé KY-19, conectado al puerto 13, mantiene el sistema en movimiento cada 60 minutos, como se puede ver en el programa de este enlace: <https://bit.ly/3wWVv04>; y una pantalla LCD 20x4, conectada a los puertos 12, 11, 10, 9, 8, 7 de la placa *Arduino MEGA 2560 R3* permite poder visualizar los datos medidos por los sensores en cualquier momento. Un esquema de las conexiones de los elementos citados anteriormente se observa en la imagen 3 del anexo de figuras y, del mismo modo, se puede encontrar toda la información sobre las conexiones en la tabla 1 del anexo de tablas.

En segundo lugar, en referencia a los costes del prototipo, hay que destacar que el precio final del mismo ha sido de 146,27 €. La mayor parte de componentes se han comprado a través de plataformas de venta *online* como *Amazon* y *AliExpress*, como ha quedado reflejado en la tabla 2 del anexo de tablas, donde también se pueden ver los precios individuales de cada uno de los componentes.

Tercero, en referencia al cultivo de algas cabe destacar la realización del mismo mediante la captura de agua de tres puntos diferentes del río Arga. Tras dos semanas de crecimiento se analizaron las diferentes muestras y se pudo observar a microscopio óptico la existencia de algas en las muestras recogidas en Ororbia (imagen 4 anexo de figuras). Al finalizar el experimento, el día 24 de abril del 2022, se ha vuelto a comprobar, a microscopía óptica, la existencia de más algas crecidas en la pecera, como se observa en las imágenes 5 y 6 del anexo.

Por último, durante 34 días, del 22 de marzo al 24 de abril de 2022, se estuvieron recogiendo los datos de los diferentes sensores tres veces por jornada. Una vez terminado el proceso se han analizado los resultados recogidos por cada sensor:

- Para las temperaturas, hay que diferenciar la ambiental, medida con el sensor DHT-11, de la del agua, medida con el termómetro acuático. En el caso del sensor DHT-11 el coeficiente de variación es del 8,61%, la media de las temperaturas de 20,33 °C y la desviación típica de 1,75 °C. En el sensor de temperatura del agua el coeficiente de variación es del 6,40%, la media de las temperaturas recogidas es de 19,18 °C y la desviación típica de 1,23 °C. Los resultados de la media diaria de los dos sensores se pueden observar más visualmente en la imagen 7 del anexo de figuras, donde se puede observar que la diferencia de la media de las dos temperaturas no es muy elevada, y siguen el mismo patrón en cuanto a subidas y bajadas.
- En segundo lugar, en referencia a los datos obtenidos por el sensor de presión BMP-180 (GY-68), se observa que el coeficiente de variación es del 0,53%, la media de las presiones es 969,15 milibares y la desviación típica es 5,15 milibares. En la imagen 8 del anexo de figuras puede observarse que la gráfica de resultados se mantiene con pocas variaciones a lo largo de todo el proceso de recogida de datos.
- En tercer lugar, en el caso del sensor de CO₂ se observa un coeficiente de variación del 37,51%, el cual es superior al 30%, así que se toma el valor de la mediana, 5.037 ppm, como resultado. En la gráfica de la imagen 9 del anexo se puede observar que valor medio máximo de CO₂ que alcanzó la pecera fue de 8.020 ppm el día 3 de abril, y el mínimo, 2.787,33 ppm, el día 26 de marzo. Así mismo, se observa también que la gráfica oscila mucho a lo largo de los 34 días.
- En cuarto lugar, el coeficiente de variación del sensor de O₂ (KE-25) es de 46,50%, superior al 30%, por lo que se vuelve a tomar la mediana de los datos recogidos como resultado, 16,70%. Los valores medios quedan

reflejados en el gráfico de la imagen 10 del anexo de figuras. En él se observa que la mayor concentración de O₂ se produjo el 25 de marzo, siendo de un 29,76%, y la menor concentración el 31 de marzo, un 12,69%. Cabe destacar que la gráfica no sigue ningún tipo de tendencia clara y que fluctúa considerablemente.

- Por último, el análisis de los datos recogidos por el sensor de humedad (DHT-11) indican que el coeficiente de variación es del 19,78%, siendo su media de 71,96%, y la desviación típica, el 14,23%. En la imagen 11 del anexo, se observan los valores medios diarios, donde los más altos rondan el 90%, y el valor más bajo se sitúa en el 51%.

El resumen de resultados queda reflejado en la tabla 3 del anexo de tablas. En ella se muestra una comparación entre los valores obtenidos teniendo en cuenta las tres mediciones por día y los valores obtenidos haciendo la media de estas tres mediciones y analizando los resultados.

CONCLUSIONES

Respondiendo a la hipótesis, se puede concluir que sí se ha podido desarrollar una bomba biológica artificial siguiendo el modelo planteado al principio del experimento. De esta manera se ha cumplido con el primero de los objetivos, siendo capaces de desarrollar un prototipo de banco de ensayo, confirmando que sí que se puede llevar a cabo y, por lo tanto, concluyendo que este proyecto es técnicamente viable. Además, el precio final del prototipo es de 146,28 €, siendo este un precio no demasiado elevado.

En cuanto a la sencilla utilización del prototipo, se puede decir que esta es una parte a mejorar, ya que durante la toma de mediciones el sensor de CO₂ dio algún que otro problema no mostrando correctamente los datos en la pantalla LCD. Además, para responder a la segunda parte de la pregunta sería necesario comparar las gráficas de CO₂ y O₂, normalizándolas para ver si cuando una baja, la otra sube o si, por el contrario, son independientes. También cabe destacar los altos valores de los coeficientes de variación de los sensores de CO₂ y O₂, y es por ello que una mejora para el futuro podría ser la implementación de unos sensores de mejor calidad, lo que encarecería el precio del prototipo, aunque la precisión de los datos sería mayor.

Finalmente, entre las futuras mejoras del proyecto hay que destacar incluir un sensor de medición del pH del agua, ya que finalmente no se ha podido incluir en este trabajo; y la hermetización de la pecera, de este modo se conseguirán unos datos mucho más precisos y se podrá observar más en profundidad si se hace realmente este intercambio de gases, así como si el cultivo de algas puede sobrevivir en unas condiciones definidas.

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría dar nuestro agradecimiento a todas las personas que me han acompañado a lo largo del proyecto. En primer lugar, a nuestro tutor Javier Elizalde, por ser la persona que nos ha dado la oportunidad de realizar este proyecto, lo ha seguido más de cerca, nos ha asesorado y ayudado a lo largo de todo el proceso. También a nuestros compañeros de equipo, quienes nos han apoyado a lo largo de todo el proyecto y cuyas memorias nos han servido de inspiración para realizar la nuestra. Al padre de Marta, José Luis Fernández, quien nos ayudó con la realización del prototipo a ordenador de la pecera, así mismo por aconsejarnos acerca de la memoria; y a la madre de Marta, Ana Pérez, por permitirnos realizar el cultivo de algas en casa. Y, por último, al Colegio Luis Amigó por proporcionarnos todos los recursos técnicos y científicos para la realización del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA

- Agricultura Electrónica. (2019) *Bomba de agua controlada con Arduino* [Online]. Disponible en: <https://create.arduino.cc/projecthub/agriculturaelectronica/bomba-de-agua-con-arduino-602930> (Consultado el 5 de mayo de 2022).
- Anónimo. (2020) *How to use KE-25 Oxygen Sensor with Arduino* [Online]. Disponible en: <https://miliohm.com/how-to-use-ke-25-oxygen-sensor-with-arduino/> (Consultado el 5 de febrero de 2022).
- Amazon. (s.f.) *Amazon* [Online]. Disponible en: https://www.amazon.es/ACUARIO-PECERA-CRISTAL-PECES-LITROS/dp/B06X4283L1/ref=mp_s_a_1_3?crd=23OOCXY6FRG4&keywords=pecera&qid=1666892018&qu=eyJxc2MiOiI2LjMwIiwicXNhIjojNi4yNyIsInFzcCI6IjUuMjEifQ%3D%3D&srefix=pecera+%2Caps%2C120&sr=8-3 (Consultado el 5 de diciembre 2022).
- Amazon. (s.f.) *Amazon* [Online]. Disponible en: https://www.amazon.es/gp/product/B06X4283L1/ref=ppx_yo_dt_b_search_asin_title?ie=UTF8&psc=1 (Consultado el 7 de enero de 2022).
- Amazon. (s.f.) *Amazon* [Online]. Disponible en: https://www.amazon.es/gp/product/B01AGPWFNS/ref=ppx_yo_dt_b_search_asin_title?ie=UTF8&psc=1 (Consultado el 10 de enero 2022).
- Cermeño, P. (2020) *Las diatomeas y los bosques invisibles del océano*. España: Catarata.
- Del Valle-Hernández, L. (s.f.) *Cómo utilizar el sensor DHT11 para medir la temperatura y humedad con Arduino* [Online]. Disponible en: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/> (Consultado el 5 de mayo de 2022).
- Del Valle Hernandez, L. (s.f.) *Programa fácil* [Online]. Disponible en: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/> (Consultado el 10 de enero 2022).
- Freeman, M. y Yellen, D. (2019) “Capturemos el carbono”, *Investigación y ciencia*, 319 (2), p. 11.
- García-Vicente, M.J. (2010) *Captura de CO₂ mediante algas unicelulares*. Trabajo fin de grado. Universidad politécnica de Madrid.
- Mallén-Ponce, M.J., Pérez-Pérez, M.E., Crespo, J.L. (2022) *PNAS* [Online]. Disponible en: <https://www.pnas.org/content/119/2/e2115261119> (Consultado el 20 de febrero 2022).
- Organización de Naciones Unidas. (s.f.). *Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos* [Online]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> (Consultado el 30 de septiembre de 2021).
- Nylamp mechatronics. (s.f.) *Tutorial sensor de presión barométrica BMP180* [Online]. Disponible en: https://naylorlampmechatronics.com/blog/43_tutorial-sensor-de-presion-barometrica-bmp180.html (Consultado el 20 de diciembre 2021).
- Prometec. (s.f.) *Sensores de CO₂: MH-Z19* [Online]. Disponible en: <https://www.prometec.net/sensores-de-co2-mh-z19/> (Consultado el 8 de marzo de 2022).
- WikiHow. (s.f.) *Cómo cultivar algas* [Online]. Disponible en: <https://es.wikihow.com/cultivar-algas#:~:text=Antes%20de%20agregar%20las%20algas,el%20medio%20de%20cultivo%20prospera> (Consultado el 19 de enero de 2022).

ANEXO DE FIGURAS

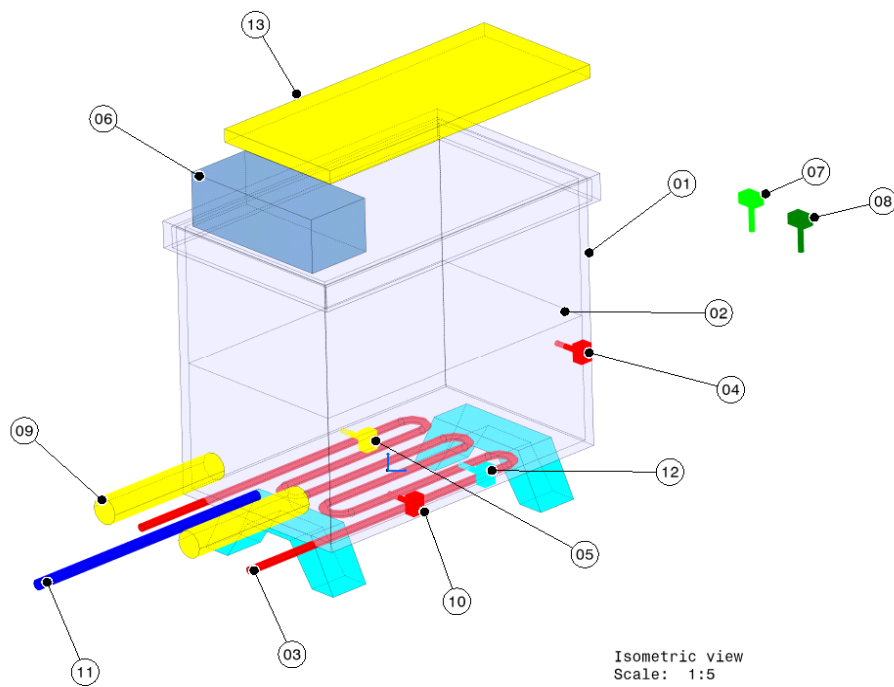


Imagen 1. Prototipo inicial del banco de ensayo realizado a ordenador mediante la aplicación. (Elaboración propia).

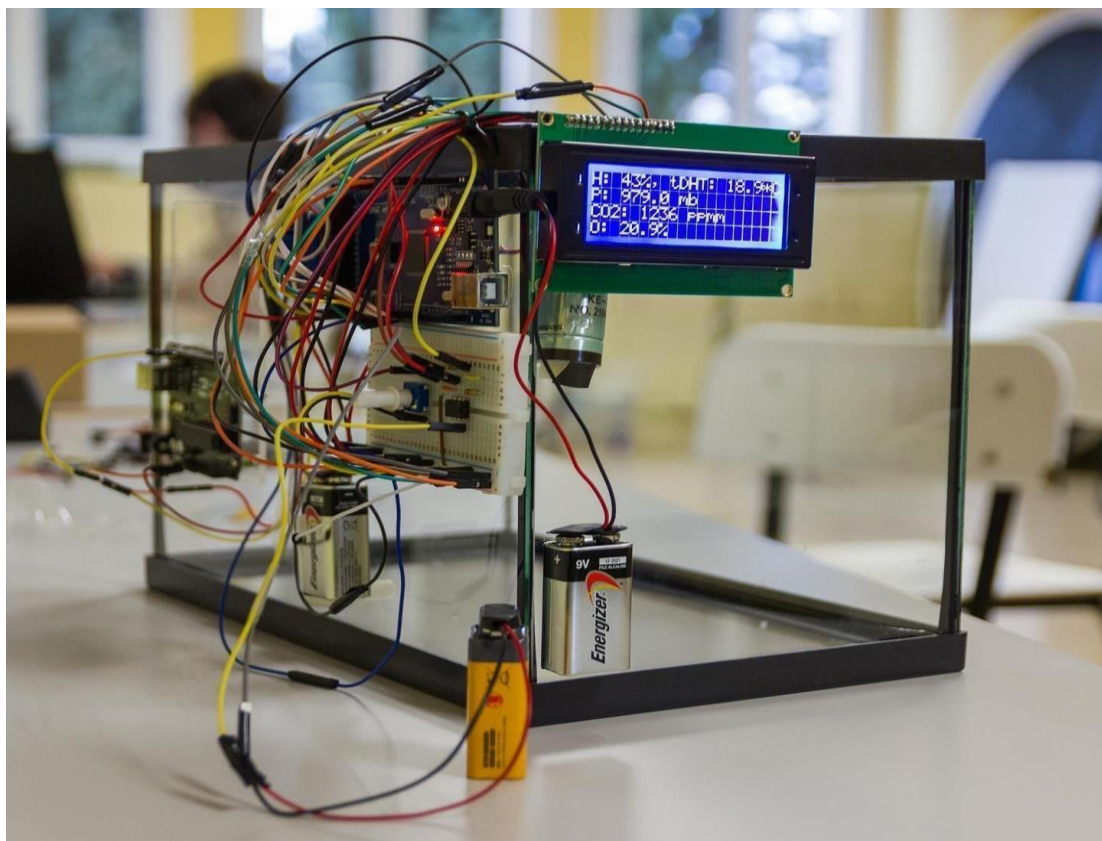


Imagen 2. Imagen del prototipo real, una vez construido con los sensores y las conexiones necesarias para su funcionamiento. (Elaboración propia).

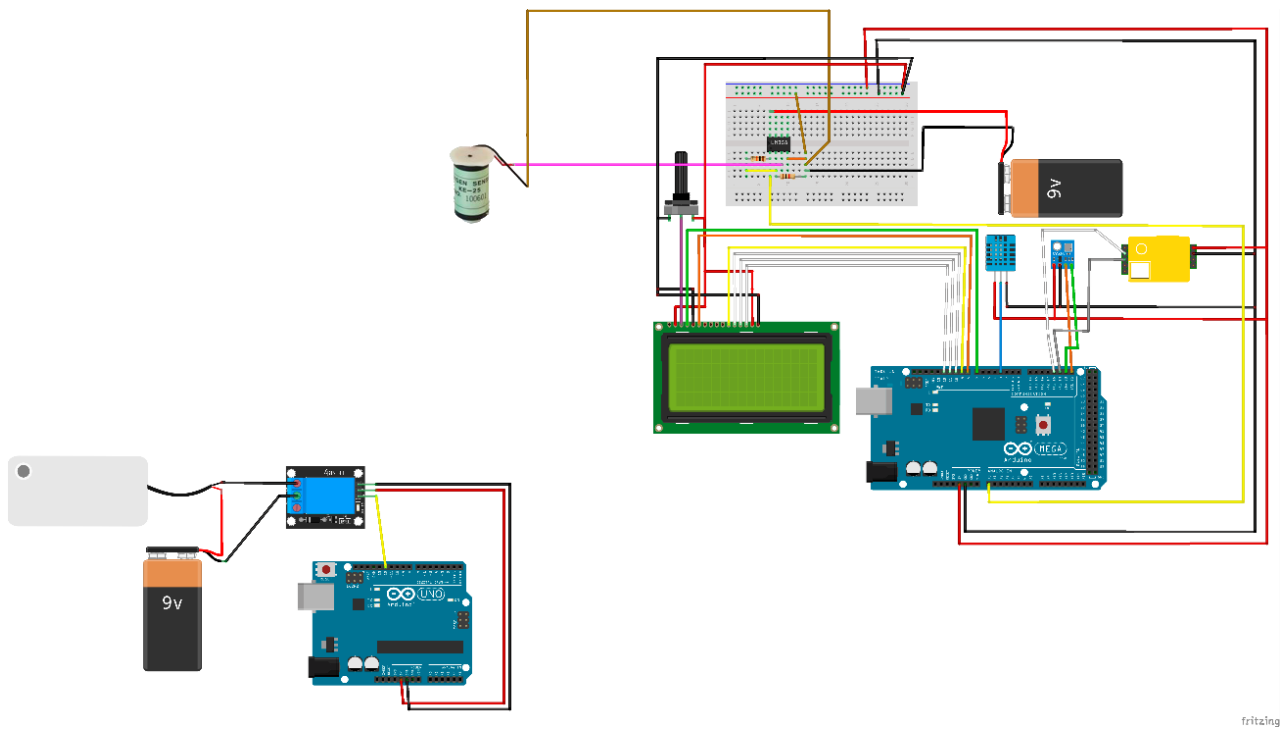


Imagen 3. Esquema de *Fritzing* con referencia a las conexiones de los sensores, cables y placas para la posterior programación de los elementos. (Elaboración propia).

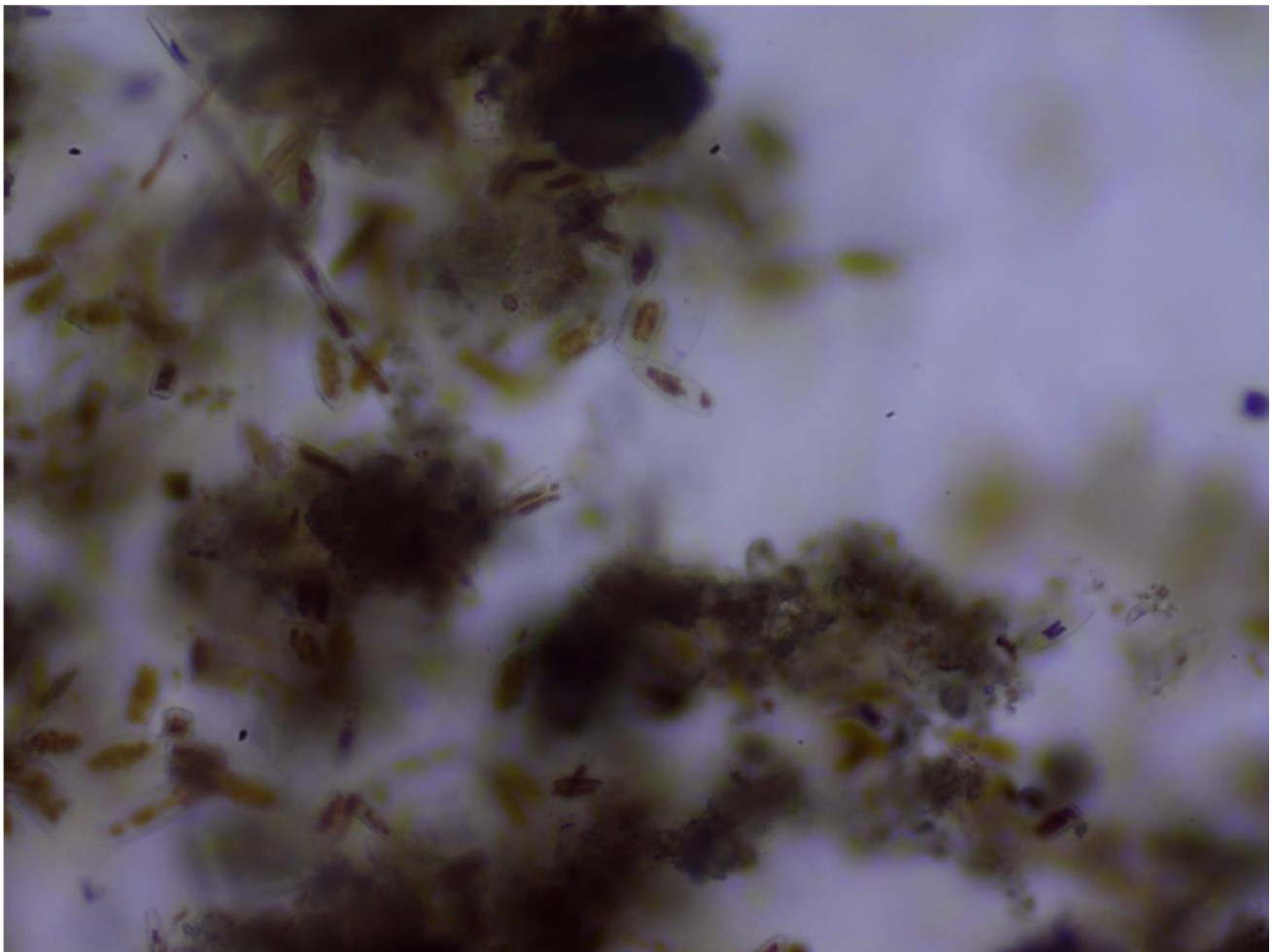


Imagen 4. Foto de las algas de la muestra recogida en Ororbia. Microscopio óptico 10X. (Elaboración propia).

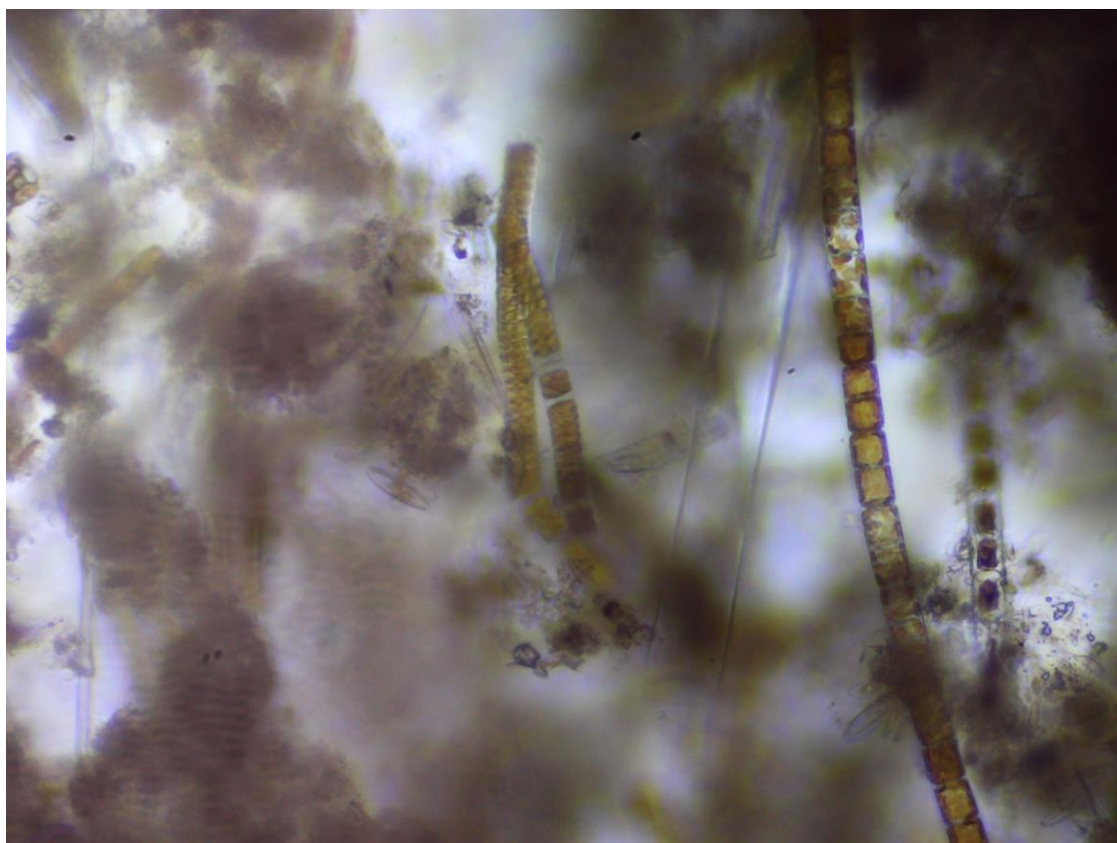


Imagen 5. Foto del cultivo de algas utilizado para realizar el experimento tras la finalización del mismo el día 24 de abril de 2022. Microscopio óptico 10X. (Elaboración propia).

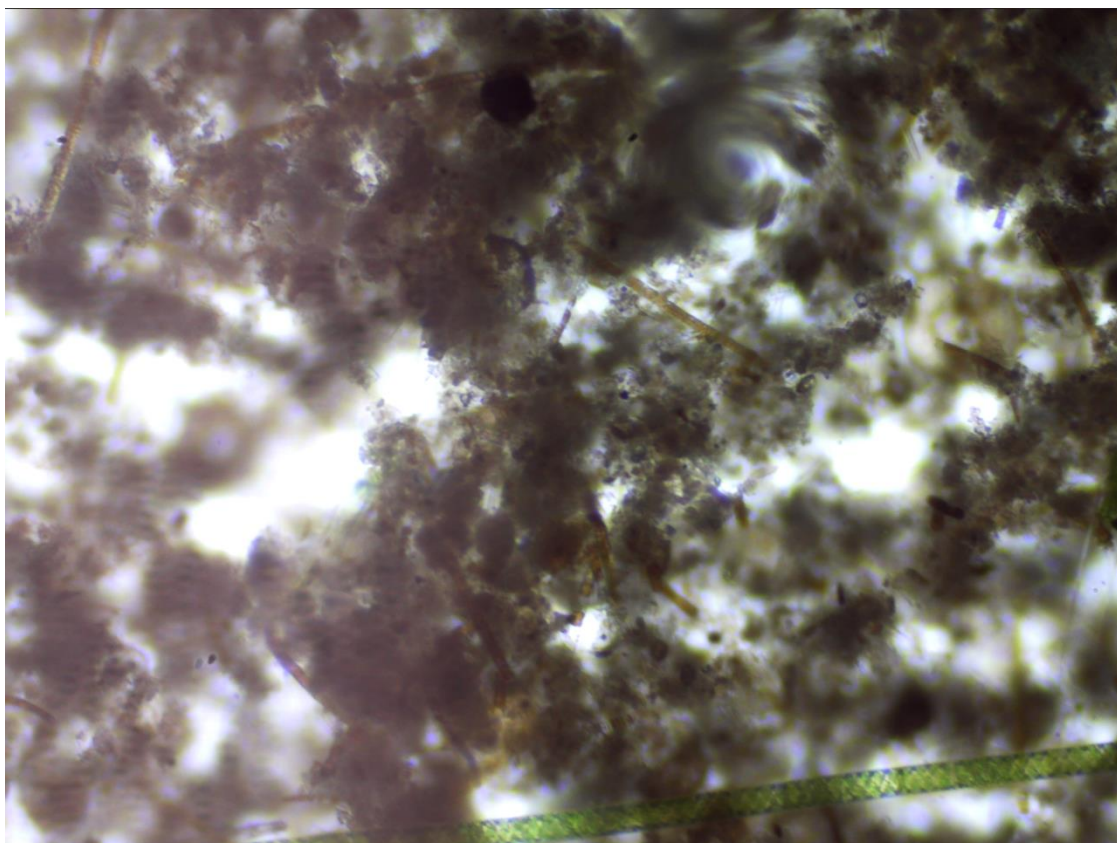


Imagen 6. Foto del cultivo de algas utilizado para realizar el experimento tras la finalización del mismo el día 24 de abril de 2022. Microscopio óptico 10X. (Elaboración propia).

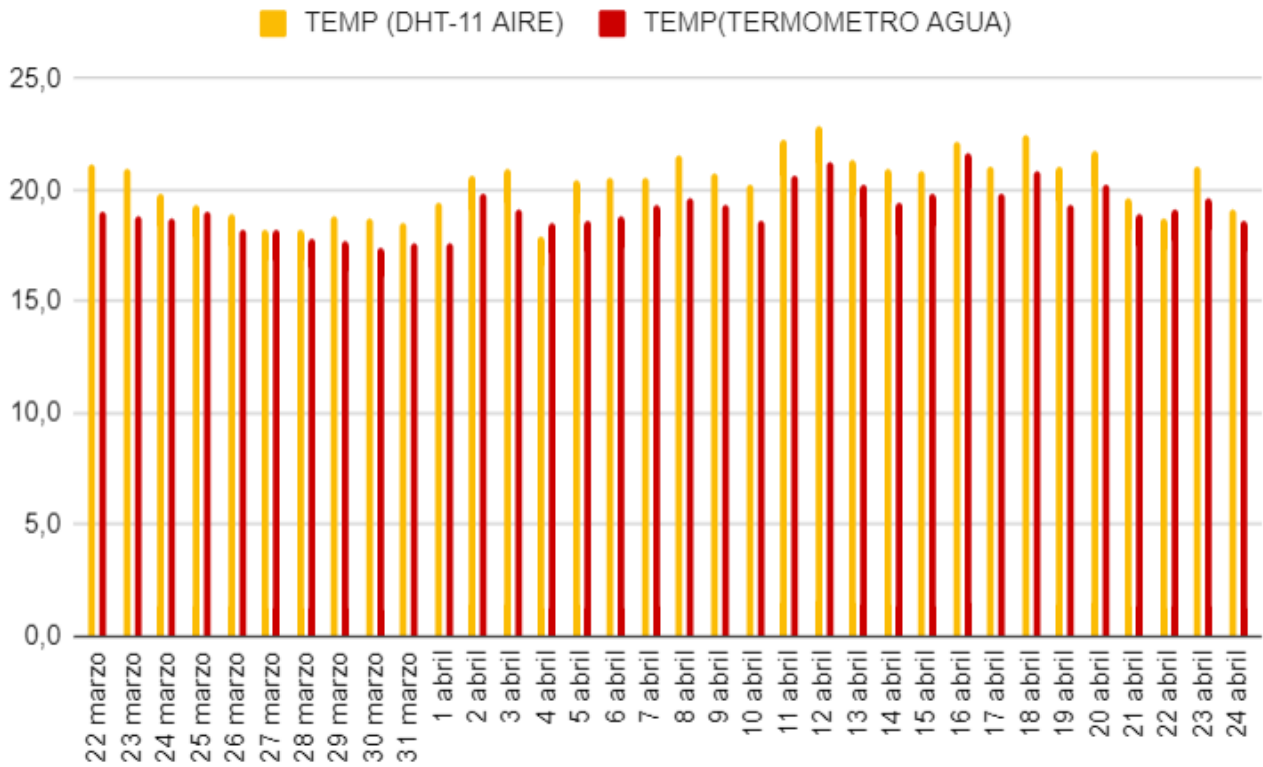


Imagen 7. Gráfica resultados obtenidos tras la realización de la media diaria de las tres mediciones del sensor DHT-11 (sensor temperatura del aire) y el termómetro del agua. (Elaboración propia).

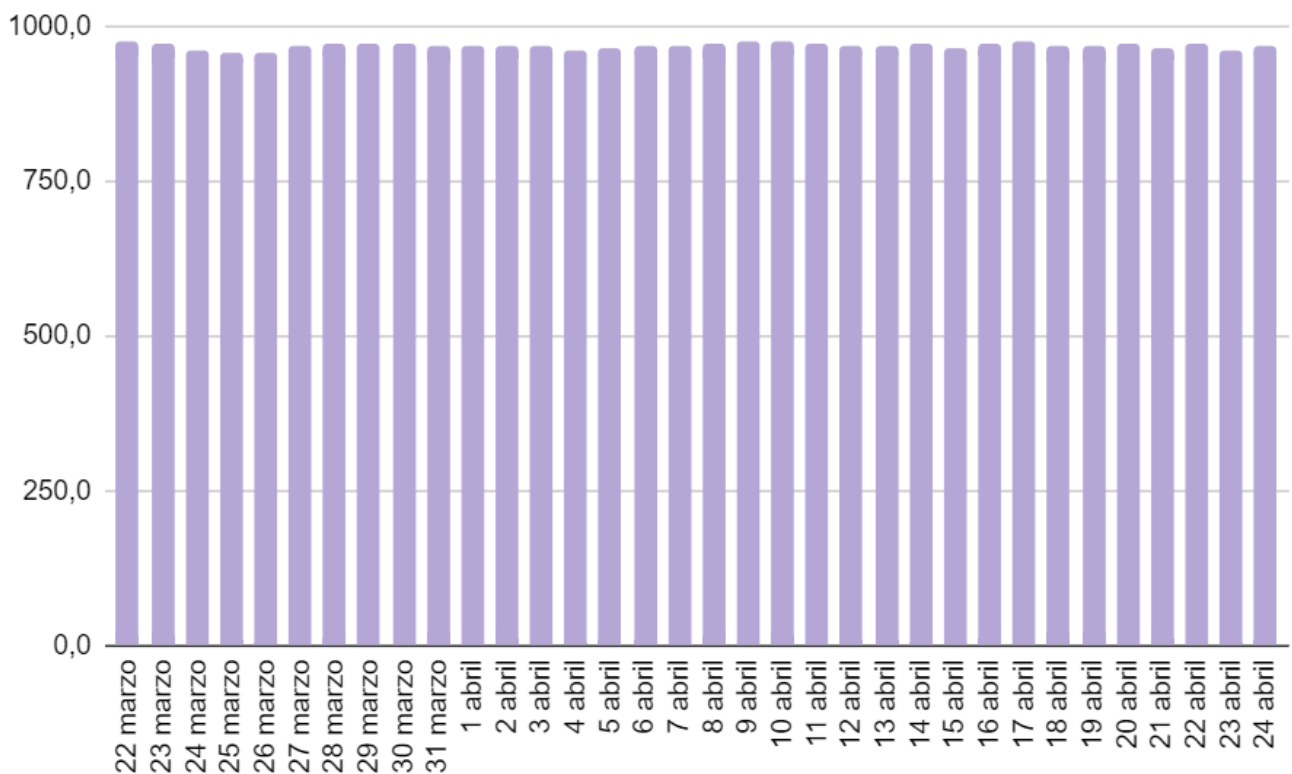


Imagen 8. Gráfica resultados obtenidos tras la realización de la media diaria de las tres mediciones del sensor de presión. (Elaboración propia).

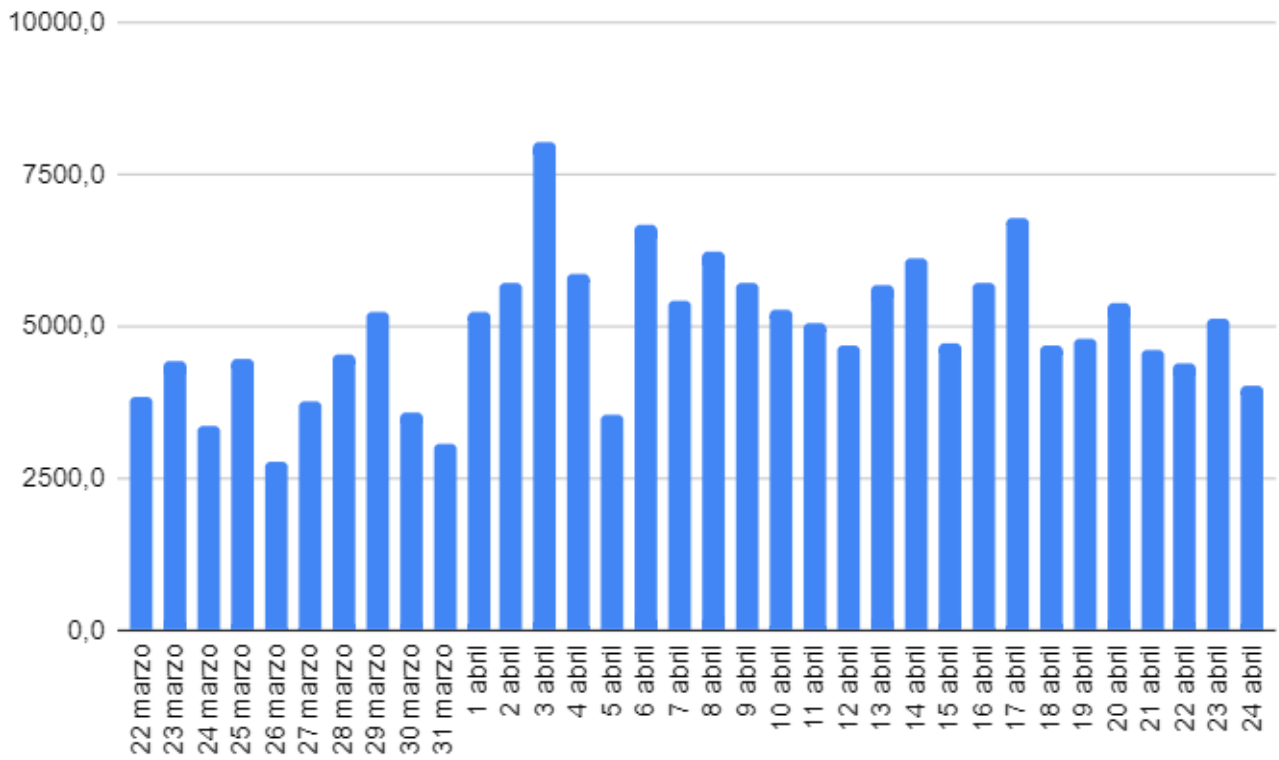


Imagen 9. Gráfica resultados obtenidos tras la realización de la media diaria de las tres mediciones del sensor de CO₂. (Elaboración propia).

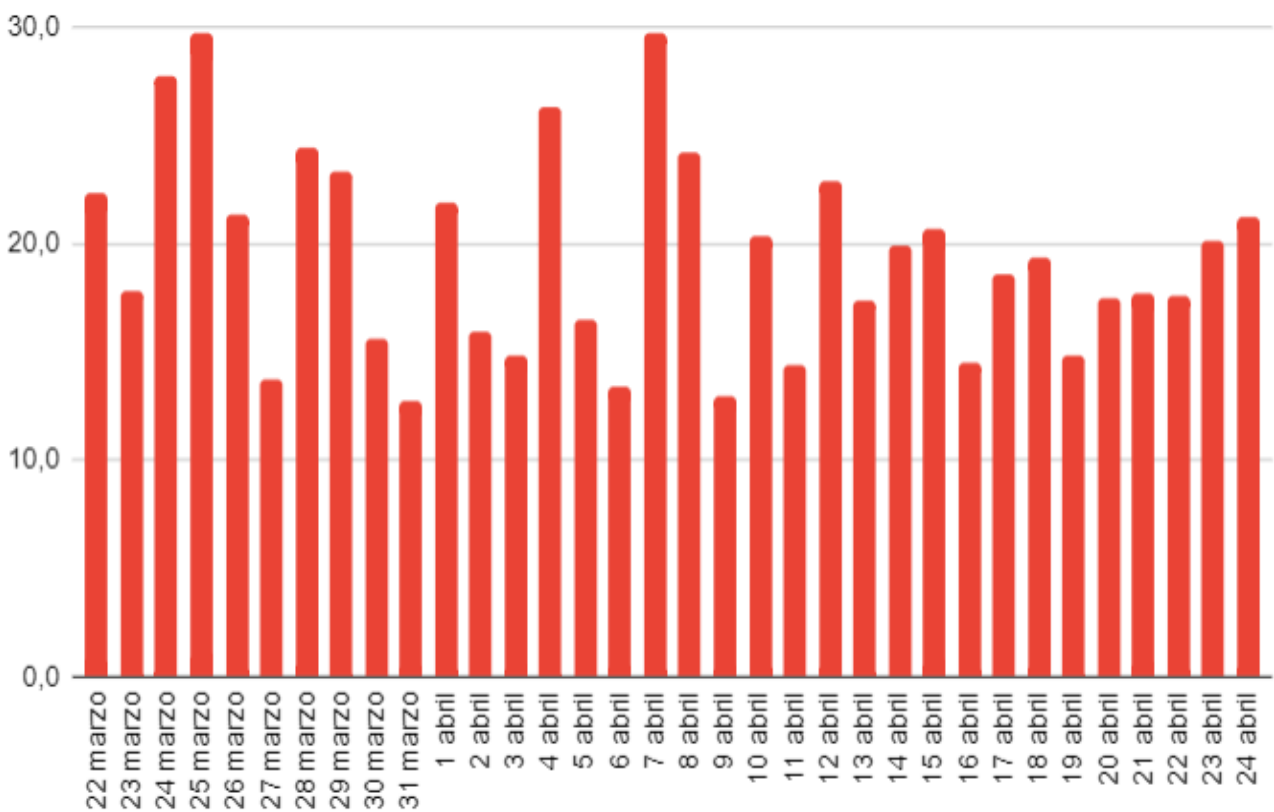


Imagen 10. Gráfica resultados obtenidos tras la realización de la media diaria de las tres mediciones del sensor de O₂. (Elaboración propia).

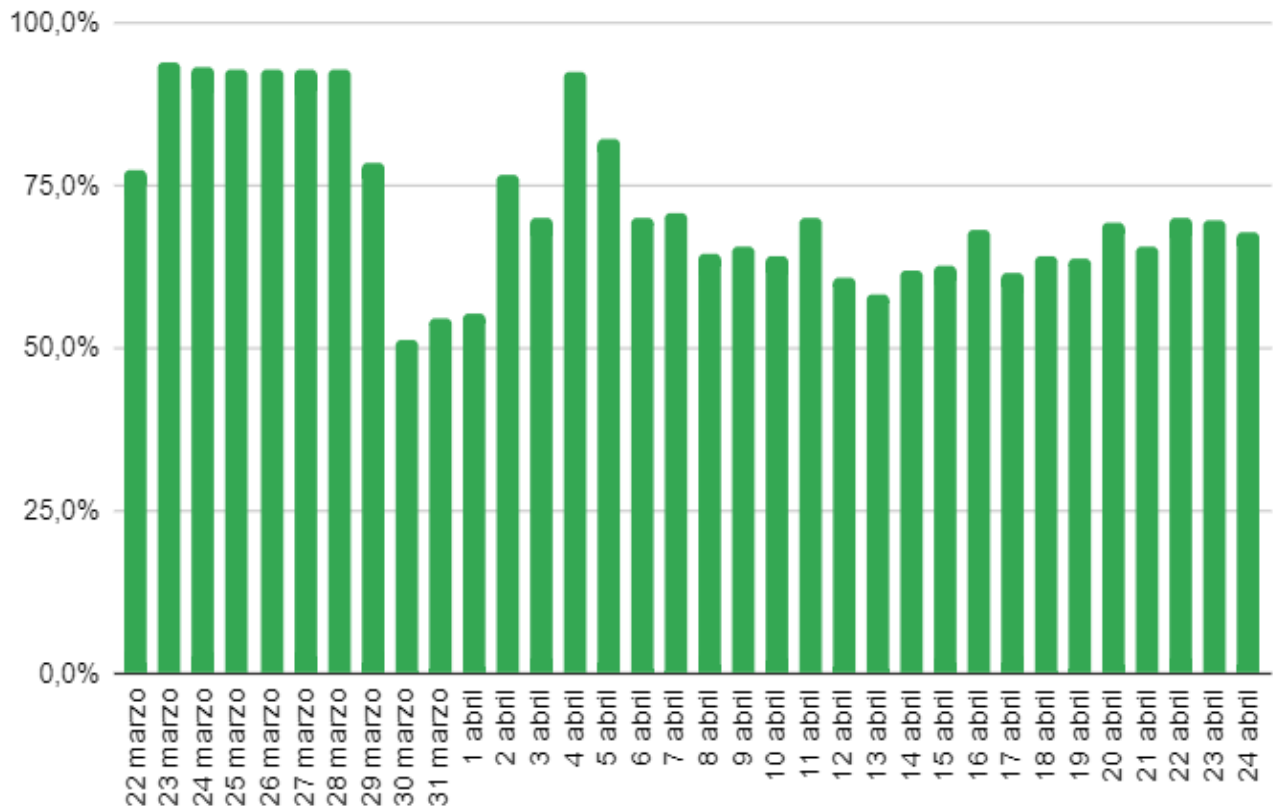


Imagen 11. Gráfica resultados obtenidos tras la realización de la media diaria de las tres mediciones del sensor de humedad DHT-11. (Elaboración propia).

ANEXO DE TABLAS

Material	Conector placa
Sensor de humedad y temperatura (DHT-11)	3 (<i>Arduino MEGA</i>)
Sensor de presión BMP-180 (GY-68)	SDA20 / SCL21 (<i>Arduino MEGA</i>)
Sensor de CO ₂ (MH-Z19)	TX118, RX119 (<i>Arduino MEGA</i>)
Sensor de O ₂ (KE-25)	A0 (<i>Arduino MEGA</i>)
Pantalla LCD 20x4	12, 11, 10, 9, 8, 7 (<i>Arduino MEGA</i>)
Relé KY-019	13 (<i>Arduino UNO</i>)

Tabla 1. Conexiones de los distintos elementos y sensores a su placa correspondiente. (Elaboración propia).

Material	Lugar de compra	Precio
Placa <i>Arduino MEGA 2560 R3</i>	<i>AliExpress</i>	11,77 €
Placa <i>Arduino UNO</i>	<i>AliExpress</i>	4,09 €
Placa <i>board</i>	<i>AliExpress</i>	1,03 €
Sensor de humedad y temperatura (DHT-11)	<i>Amazon</i>	2,60 €
Sensor de presión BMP-180 (GY-68)	<i>AliExpress</i>	1,87 €
Sensor de CO ₂ (MH-Z19)	<i>AliExpress</i>	20,57 €
Sensor de O ₂ (KE-26)	<i>AliExpress</i>	56,20 €
Bomba de agua	<i>Amazon</i>	3,75 €
Relé KY-019	<i>Amazon</i>	1,58 €
Pila 9V x 4	<i>Amazon</i>	4,22 €
Portapilas	<i>Amazon</i>	3,00 €
Pantalla LCD 20x4	<i>Amazon</i>	6,33 €
Termómetro acuático digital	<i>Amazon</i>	2,95 €
Pecera	<i>Amazon</i>	26,50 €
TOTAL		146,28 €

Tabla 2. Lista de precios y lugares de compra de los distintos elementos del proyecto. (Elaboración propia).

		T aire (°C)	T agua (°C)	Presión (milibar)	CO ₂ (ppm)	O ₂ (%)	HUMEDAD (%)
RESULTADOS POR MEDICIONES	Media	20,33	19,18	969,15	4957,90	19,47	71,96
	Desviación típica	1,75	1,23	5,15	1859,50	9,05	14,23
	Coefficiente de variación (%)	8,61	6,40	0,53	37,51	46,50	19,78
	Mediana	20,20	19,25	969,55	5037,00	16,70	69,00
MEDIA DIARIA	Media	20,33	19,18	969,15	4957,90	19,47	71,96
	Desviación típica	1,32	1,03	4,59	1125,09	4,70	12,66
	Coefficiente de variación (%)	6,51	5,39	0,47	22,69	24,16	17,59

Tabla 3. Tabla de resultados por mediciones diarias y haciendo la media de estas tres mediciones. (Elaboración propia).