



TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN
CIENCIAS DEL MAR

Optimización del *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) en la cría *ex situ* de especies del género *Montipora* (Blainville, 1830)

Alumno: Víctor Tena Gascó

Tutor: Francisco Javier Torres Gavilá

Co-tutor: Alejandro Jesús Molera Arribas

Curso académico 2021-2022



AGRADECIMIENTOS

Este proyecto no hubiera sido posible sin la participación de todas aquellas personas que me han rodeado durante este tiempo y han creído en la idea planteada y mi dedicación a esta.

En primer lugar, agradecer a Dr. Javier Torres Gavilá por su apoyo y confianza en el proyecto que me ha tutorizado. Al doctorando Alejandro Jesús Molera, el cual ha actuado de guía y orientación en todo el diseño y puesta a punto del experimento, donde sin su ayuda no podría haberse realizado con el éxito con el que se ha llevado a cabo. Y al Instituto de Investigación en Medio Ambiente y Ciencia Marina (IMEDMAR-UCV) por el apoyo logístico y técnico en muchos de los aspectos del proyecto, además del apoyo de todo el personal de esta institución que ha colaborado en el mantenimiento y desarrollo del ensayo.

También agradecer a todos aquellos de mis profesores que no han puesto ningún impedimento en contestar al reclamo de orientación y experiencia en sus respectivas especialidades. Especialmente, a Dr. Germán Martín González, por su ayuda y enfoque en el tratamiento estadístico de los datos.

A todos mis compañeros y amigos, que siempre han estado ahí, para distraerme y entenderme, donde sin ellos nada hubiera sido igual, ni nada hubiera salido tan fácilmente y no hubiera tenido la motivación como para día a día llevar a cabo mi tarea.

Por último y más especialmente, a mi familia, que siempre ha creído en mí y en mis capacidades, y siempre ha soportado con gran amor y empatía tanto los momentos buenos como malos que he vivido en el transcurso de este trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	I
ÍNDICE DE TABLAS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
INTRODUCCIÓN	1
Introducción a la acuicultura ex situ de especies coralinas y mercados relacionados.	1
Estado actual de los arrecifes de coral y su relación con la acuicultura.	1
Acuicultura de corales	2
El coral y las industrias relacionadas	3
Descripción del género <i>Montipora</i> (Blainville, 1830) y especies utilizadas en el estudio.	4
<i>Montipora digitata</i> (Dana, 1846).	6
<i>Montipora capitata</i> (Dana, 1846).	7
<i>Photosynthetically Active Radiation</i> (PAR) y su relación con los corales constructores de arrecifes.	9
Crecimiento de los corales y técnicas de medida.	10
OBJETIVOS	13
MATERIAL Y METODOS	14
Preparación, mantenimiento y gestión del tanque de cría de corales.	14
Preparación y ciclado del acuario	14
Parámetros y condiciones del acuario	17
Temperatura	18
Salinidad	18
Compuestos nitrogenados	18
Fosfatos (PO ₄ ³⁻)	19
pH	19
Calcio (Ca)	20
Magnesio (Mg)	20
Alcalinidad (Dureza de carbonatos)	21
Fotoperiodo	21
Gestión y mantenimiento del acuario	21
Revisión y mantenimiento	21
Test y control de parámetros	22
Dosificación	23
Cambios de agua	24

Microesquejado de las piezas de <i>Montipora</i> .	24
Medición del <i>Photosynthetically Active Radiation</i> (PAR) e instalación del experimento.	26
Técnicas de medida del crecimiento de los fragmentos de coral.	28
Tratamiento estadístico de datos.	29
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
Crecimiento en condiciones artificiales	30
Comparaciones PAR-especie	32
Planteamiento	32
Condiciones	32
Normalidad	32
Homocedasticidad	33
ANOVA bifactorial	33
Tasas de crecimiento	37
CONCLUSIONES	40
LIMITACIONES Y OBSERVACIONES DEL EXPERIMENTO	41
LÍNEAS FUTURAS	43
Reproducibilidad y producción	43
Técnica de medida	44
BIBLIOGRAFÍA	45
ANEXO I	i
ANEXO II	iii
ANEXO III	v
ANEXO IV	vii
ANEXO V	x
ANEXO VI	xí

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Diagrama de la estructura del pólipo de un coral del orden Scleractinia seccionado verticalmente. La sección representa el interior del pólipo. Fuente: Reyes & Santodomingo, 2002.	5
Figura. 2 <i>Montipora digitata</i> . Ampliación de los extremos de sus ramificaciones y sus pólipos. Fuente: Veron et al., 2022.	6
Figura. 3 Distribución mundial de la especie <i>M. digitata</i> (marrón). Fuente: IUCN, 2021.	7
Figura. 4 <i>Montipora capitata</i> . Ampliación de los extremos de sus ramificaciones y sus pólipos. Fuente: Veron et al., 2022.	7
Figura. 5 Distribución mundial de la especie <i>M. capitata</i> (marrón). Fuente: IUCN, 2021.	8
Figura. 6 Esquema del sistema confeccionado para el desarrollo del experimento. Fuente: Elaboración propia.	14
Figura. 7 Ejemplo del resultado de una de las piezas tras el microesquejado de los corales utilizados para el estudio. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura. 8 Mapa de los niveles de PAR en la zona del acuario del experimento (lado derecho, 10 cm de profundidad). Las zonas de PAR establecidas son $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (círculo rojo), $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (círculo verde) y $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (círculo negro). Fuente: Elaboración propia.	26
Figura. 9 Esquema e imagen de la infraestructura confeccionada para la colocación de los esquejes durante el desarrollo del experimento. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura. 10 Ejemplos de la codificación para distinguir las piezas utilizadas en el experimento (Ej: 1- 150CAP1V, 2- 150CAP2N, 3- 150DIG3B). Fuente: Elaboración propia.	28
Figura. 11 Grafica del crecimiento experimentado por cada uno de los individuos objeto de estudio (líneas de color). En el eje horizontal está representado el tiempo (días) y en el eje vertical el peso medido en gramos. Fuente: elaboración propia.	31
Figura. 12 Gráfico de la diferencia de peso media (eje Y) para cada nivel de PAR (eje x). Fuente: Elaboración propia.	35
Figura. 13 Gráfico de la diferencia de peso media (eje Y) de cada especie (líneas de color) para cada nivel de PAR (eje x). Fuente: Elaboración propia.	36

Figura V. 1 Recopilación de los gráficos de los valores de los parámetros frente al tiempo (días). Los parámetros representados son: Salinidad (1), Temperatura (2), Alcalinidad (3), Concentración de Ca (4), Concentración de Mg (5), Concentración de Nitratos (6) y Concentración de Fosfatos (7). Fuente: Elaboración Propia. _____ x

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla. 1 Consignas establecidas para los parámetros controlados durante el ensayo.	30
Tabla. 2 Valores de diferencia de peso final-inicial (columna 4) de cada individuo analizado en el experimento (columna 1), de los cuales también se indica la especie (columna 2) y el PAR al que se ha sometido (Columna 3).	32
Tabla. 3 Resultados obtenidos de R-commander tras la prueba ANOVA bifactorial. La primera columna hace referencia a la comparación que se ha realizado, la quinta hace referencia al p-valor y la sexta al código de significancia.	33
Tabla. 4 Resultado de los contrastes post-hoc hechos mediante el método DHS de Tukey. Los resultados proporcionan los intervalos de confianza (columna 3 y 4) y el p-valor ajustado (columna 5) para los contrastes de los diferentes PAR (columna 1).	34
Tabla. 5 Tasa de crecimiento y desviación típica para cada grupo de ejemplares establecidos según la especie y el nivel de PAR al cual están sometidos.	38
Tabla I.1 Ficha de control de sistemas elaborada para el experimento.	i
Tabla II.1 Ficha de control de los elementos vivos del sistema y su alimentación.	iii
Tabla III.1 Ficha de control de parámetros elaborada para el experimento. En cada celda se apunta el valor del parámetro para cada día correspondiente.	v
Tabla IV.1 Recopilación de los datos en bruto (peso de las piezas de coral en gramos) recolectados durante el transcurso del experimento.	vii
Tabla VI.1 Recopilación de las tasas de crecimiento de cada individuo para cada intervalo de muestreo para este experimento.	xi

RESUMEN

La acuicultura *ex situ* de corales es una práctica cada vez más relevante, donde las técnicas de fragmentación ofrecen la posibilidad de cubrir una demanda creciente de ejemplares, evitando la destrucción de los arrecifes naturales, ya que en el pasado se extraían del medio natural (Guzmán et al., 1993; Leal et al., 2016). En este sentido, la mejora de las técnicas de cultivo y la optimización de los parámetros fisicoquímicos para su crecimiento es fundamental para el futuro de los sectores relacionados. En el presente trabajo se ha estudiado la influencia de la *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) en el crecimiento de los fragmentos de coral, obtenidos por microfragmentación (Page et al., 2018). Las pruebas se realizaron en dos especies del género *Montipora* (*M. digitata* (Dana, 1846) y *M. capitata* (Dana, 1846)). El estudio se realizó durante 57 días en un ambiente controlado, colocando los individuos de coral en valores de PAR de $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, con parámetros de salinidad y temperatura constantes y un suministro periódico de magnesio, carbonato y calcio. Los datos de crecimiento se recogieron dos veces por semana calculando el peso húmedo utilizando una balanza de precisión con un error de 0,001 g. Los resultados revelaron un crecimiento que varía según la especie y el PAR al cual se han sometido, donde *M. digitata* crece más en valores de PAR de $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, y *M. capitata* en valores de PAR de $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Palabras clave:

Crecimiento de coral, Montipora, Radiación fotosintéticamente activa, PAR, acuicultura ex situ de corales, microfragmentación, peso húmedo.

ABSTRACT

Ex situ coral aquaculture is an increasingly relevant practice, where fragmentation techniques offer the possibility of covering an increasing demand for specimens, avoiding the destruction of natural reefs, since in the past obtaining these organisms were obtained by extraction from the natural environment (Guzmán et al., 1993; Leal et al., 2016). In this sense, improved farming techniques for these species and the optimization of physicochemical parameters for their growth is fundamental for the future of the related industries. In the present work, the influence of *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) on the growth of coral fragments, obtained by microfragmentation (Page et al., 2018) has been studied. The tests were carried out on two species of corals corresponding to the genus *Montipora* (*M. digitata* (Dana, 1846) and *M. capitata* (Dana, 1846)). The study was made during 57 days in a controlled environment, with constant salinity and temperature parameters over time and a constant supply of magnesium, carbonate, and calcium, where the independent variable was PAR, placing coral samples at PAR values of $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ and $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Growth data were collected twice a week by wet weight using a precision balance with a 0.001 g error. The results revealed a growth which varies according to the species and the PAR to which they have been subjected, where *M. digitata* grows more at PAR values of $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, and *M. capitata* at PAR values of $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

Key words:

Coral growth, Montipora, Photosynthetically active radiation, PAR, ex situ coral aquaculture, Microfragmenting, wet weight.

INTRODUCCIÓN

Introducción a la acuicultura *ex situ* de especies coralinas y mercados relacionados.

Estado actual de los arrecifes de coral y su relación con la acuicultura.

Actualmente encontramos una creciente demanda mundial de recursos marinos, entre los que se encuentran los corales cuyo fin es satisfacer las necesidades de diversas industrias como es la farmacéutica o la acuariología ornamental (Leal et al., 2016; Rocha et al., 2013; Sheridan et al., 2013). Esta demanda se ha cubierto durante años con la extracción de estos organismos directamente del medio natural, situación que, junto al cambio climático, ha provocado la degradación de muchos de los arrecifes que existen en el mundo (Guzmán et al., 1993; Leal et al., 2016; Rocha et al., 2013).

Por este motivo, la recuperación de los arrecifes de coral y la demanda de especies coralinas que habitan en éstos, pasa por la acuicultura de las especies que los componen (Leal et al., 2016), ya que la respuesta a largo plazo de los arrecifes de coral al cambio climático depende de la capacidad de los simbioses de los corales constructores de arrecifes para adaptarse o aclimatarse a temperaturas más cálidas (Baker et al., 2004).

En la actualidad, no todas las especies de coral están en un buen estado de conservación, de hecho, aunque no todas están en alto riesgo de desaparecer, en el caso del género *Montipora*, todas las poblaciones de las especies registradas en la IUCN Red List, se encuentran en descenso (IUCN, 2021).

Estas especies poseen gran importancia ecológica y antropológica, ya que los arrecifes que configuran, son sistemas biológicos complejos de alta productividad esenciales para el correcto funcionamiento de ciertas comunidades, poblaciones y especies que viven por y para estos arrecifes (Stoddart, 1969). Además, desde el punto de vista antropológico, su gran valor se debe al hecho de que proporcionan protección a la costa, suministran alimentos y productos naturales y fomentan el turismo (Sheridan et al., 2013).

Acuicultura de corales

“La acuicultura es el cultivo de organismos acuáticos tanto en zonas costeras como del interior que implica intervenciones en el proceso de cría para aumentar la producción”(FAO, 2022).

Según la definición de la FAO, lo que se busca en la acuicultura es aumentar la producción de organismos acuáticos, es por este motivo que el propósito del presente trabajo está centrado en este aumento de la producción optimizando el Photosynthetically Active Radiation (PAR) al que se exponen las especies elegidas para el estudio, con el objetivo de un mayor crecimiento en el menor tiempo posible.

En concreto la acuicultura de especies coralinas, busca cultivar de manera *in situ* y *ex situ* donde se produce una intervención del ser humano con tal de incrementar la producción y supone, además, poseer la propiedad de las poblaciones de las colonias de corales que se están cultivando.

El cultivo de corales se puede empezar bien extrayendo las piezas del medio natural (Guzmán et al., 1993; Leal et al., 2016) y aclimatarlas a un medio controlado dejándolas crecer o bien utilizando técnicas alternativas relacionadas con la reproducción de corales mediante técnicas como la microfragmentación (Page et al., 2018) a partir de piezas grandes que se fragmentan y se dejan crecer estos fragmentos. Cada vez más este tipo de técnicas adquiere mayor relevancia ya que son menos destructivas y facilitan la restauración de los arrecifes de coral.

Dentro de la acuicultura de corales, se pueden encontrar dos variantes según el lugar donde se instale el cultivo: *in situ* (maricultura) o *ex situ* (Sheridan et al., 2013).

La maricultura o acuicultura *in situ* se caracteriza por la producción de organismos marinos en el océano utilizando agua de mar natural (Leal et al., 2013). Esto supone que el ser humano no va a ser capaz de controlar ciertas variables del cultivo.

Por otro lado, la acuicultura *ex situ* o *captive breeding*, se refiere al proceso de cría de animales en entornos controlados, donde el ser humano es capaz de controlar, casi por completo, los parámetros que pueden influir en el cultivo de estos organismos (Leal et al., 2013). En concreto, este tipo de cultivo se considera una solución sostenible para satisfacer la creciente demanda de estos organismos de alto precio por parte de las industrias relacionadas (Rocha et al., 2013). Además, tiene la ventaja de maximizar las tasas de supervivencia y crecimiento mediante la optimización de las condiciones de

cultivo, es decir, la iluminación, el flujo de agua y la disponibilidad de alimentos (Forsman et al., 2006; Khalesi, 2008).

El coral y las industrias relacionadas

La acuicultura de corales está centrada en tres industrias principalmente debido a la demanda creciente que generan. Estas industrias son: el comercio de la ornamentación marina, la industria farmacéutica y la restauración de arrecifes (Leal et al., 2016).

El comercio de la ornamentación marina es una industria multimillonaria que sigue dependiendo en gran medida de la recolección de organismos silvestres para satisfacer una demanda cada vez mayor (Rocha et al., 2013) y, que como ya se ha comentado anteriormente, ha encontrado en la cría *ex situ* una manera de cubrir la demanda requerida sin ser una actividad necesariamente destructiva para el medio.

Por otro lado, en la industria farmacéutica, los productos de origen marino son conocidos como el “oro azul” (Leal et al., 2013) debido a la importancia que han adquirido a consecuencia de la necesidad de esta industria por avanzar y desarrollar nuevos remedios, curas y medicamentos. Cabe destacar que especialmente los corales a causa de su diversidad de metabolitos secundarios, según las evidencias científicas obtenidas sugieren que sus bacterias simbióticas producen la mayor parte de estos metabolitos bioactivos de interés para la industria (Leal et al., 2013).

Por último, debido a que los arrecifes de coral están sometidos a una serie de perturbaciones antropogénicas de manera constante, como la disminución de la calidad del agua, las prácticas pesqueras destructivas, la sobreexplotación de las especies de los arrecifes y los brotes de depredadores y enfermedades de los corales (Boström-Einarsson et al., 2020); ha surgido la necesidad de que estos sean restaurados. El efecto que ha tenido esta situación no es otro que la aparición de la “industria” de la restauración de corales, donde se han generado una gran cantidad de metodologías y estrategias para llevar a cabo esta necesaria restauración (Baker et al., 2004; Boström-Einarsson et al., 2020; Leal et al., 2016).

Descripción del género *Montipora* (Blainville, 1830) y especies utilizadas en el estudio.

Las especies utilizadas en este ensayo pertenecen al género *Montipora* (Blainville, 1830), el cual pertenece al filo Cnidaria de la clase Anthozoa. La posición taxonómica de este género es:

- **Reino:** Animalia
- **Filo:** Cnidaria
- **Clase:** Anthozoa
- **Subclase:** Hexacorallia
- **Orden:** Scleractinia
- **Familia:** Acroporidae
- **Género:** *Montipora* (Blainville, 1830), (WoRMS Editorial Board, 2022).

Los organismos de la clase Anthozoa corresponden a pólipos que no presentan un estado medusa, por lo que se consideran sésiles. Éstos son exclusivamente marinos, pueden presentarse tanto en colonias como individualmente, y muchos pueden estar provistos de estructura esquelética (Hickman et al., 2021).

Concretamente el género *Montipora*, se encuentra dentro de la subclase de antozoos Hexacorallia, que “presentan una estructura hexámera (de seis o múltiplo de seis) o simetría polímera, y tienen tentáculos tubulares simples que se disponen en uno o más círculos alrededor del disco oral” (Hickman et al., 2021).

Estas especies se encuentran en el orden Scleractinia, también conocidas como corales duros o “*stony corals*” (Brusca et al., 2016), se caracterizan por “poseer tentáculos dispuestos generalmente en la región marginal del disco oral y, a menudo, mostrar una protuberancia al final. Actualmente, contiene 31 familias, alrededor de 240 géneros y más de 1,500 especies, que incluyen tanto a corales zooxantelados (que albergan el dinoflagelado simbiótico del género *Symbiodinium* (Freudenthal, 1962)) como los corales azooxantelados” (Goffredo & Dubinsky, 2016; Reyes & Santodomingo, 2002).

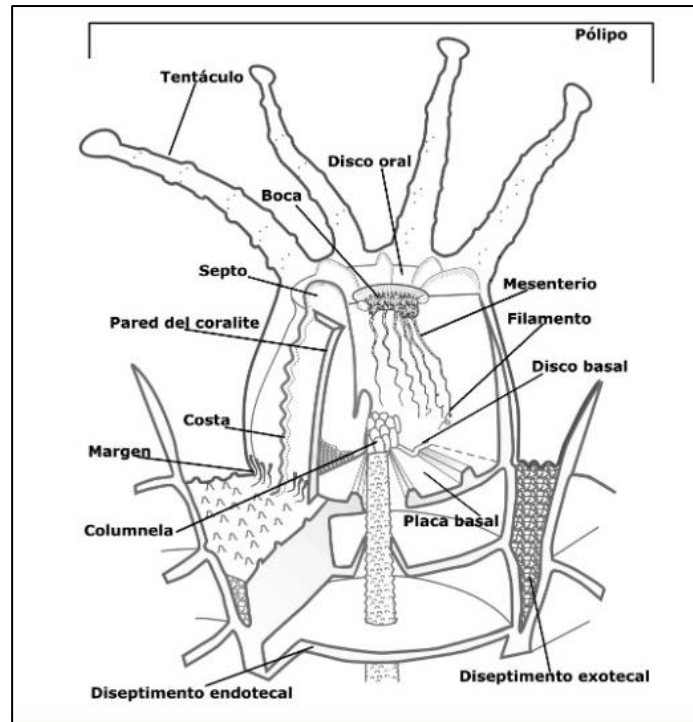


Figura. 1 Diagrama de la estructura del pólipo de un coral del orden Scleractinia seccionado verticalmente. La sección representa el interior del pólipo. Fuente: Reyes & Santodomingo, 2002.

Dentro de este orden están clasificadas en la familia Acroporidae los cuales “presentan una estructura ramosa, raramente son masivos o incrustantes, están ramificados con coralitos (exoesqueleto individual de cada pólipo) axiales o principales más grandes que los numerosos coralitos radiales que brotan de ellos, los coralitos radiales tienen formas diversas, tienen un *coenosteum* (exoesqueleto de la colonia de coral) ligero, reticulado, espinoso, acostillado o “pseudocostillado”; columela y septos ausentes” (Wallace et al., 2012). También se caracteriza a nivel taxonómico por la complejidad que supone la clasificación de muchas de las especies de los géneros *Montipora* y *Acropora* (Oken, 1815), junto a la abrumadora importancia ecológica de este último género (Veron & Wallace, 1984).

Montipora digitata (Dana, 1846).

Figura. 2 *Montipora digitata*. Ampliación de los extremos de sus ramificaciones y sus pólipos. Fuente: Veron et al., 2022.

Posición taxonómica de *Montipora digitata* (Dana, 1846):

- **Reino:** Animalia
- **Filo:** Cnidaria
- **Clase:** Anthozoa
- **Subclase:** Hexacorallia
- **Orden:** Scleractinia
- **Familia:** Acroporidae
- **Género:** *Montipora*
- **Especie:** *Montipora digitata* (Dana, 1846), (WoRMS Editorial Board, 2022).

Características morfológicas:

“Las colonias de *M. digitata* tienen el *coenosteum* liso, son digitadas o arborescentes, con ramas irregularmente anastomosadas (unión de unos elementos anatómicos con otros de la misma naturaleza), que varían en longitud y forma según las condiciones ambientales. Las colonias de las llanuras arrecifales intermareales y submareales, donde esta especie es particularmente abundante, tienen ramas cortas, aplanadas y muy anastomosadas. Las colonias de aguas más profundas tienen ramas más alargadas y desarrollan un patrón de ramificación laxo. El aspecto general también varía con la profundidad, donde las colonias de los biotopos intermareales tienen coralitos relativamente pequeños, poco profundos y muy espaciados, mientras que las de aguas más profundas son más grandes, más espaciadas y excavadas” (Veron & Wallace, 1984).

Coloración:

Su coloración habitual es de tono crema pálido o marrón, aunque a veces puede presentar una coloración rosácea o azulada (Veron et al., 2022).

Hábitat:

Esta especie habita principalmente entornos de arrecifes poco profundos y puede ser una especie dominante en las marismas poco profundas (Veron et al., 2022).

Distribución:

Figura. 3 Distribución mundial de la especie *M. digitata* (marrón). Fuente: IUCN, 2021.

Región Indo-oeste Pacífica (Briggs & Bowen, 2012; IUCN, 2021; Veron et al., 2022).

Montipora capitata (Dana, 1846).



Figura. 4 *Montipora capitata*. Ampliación de los extremos de sus ramificaciones y sus pólipos. Fuente: Veron et al., 2022.

Posición taxonómica de *Montipora capitata* (Dana, 1846):

- **Reino:** Animalia
- **Filo:** Cnidaria
- **Clase:** Anthozoa
- **Subclase:** Hexacorallia
- **Orden:** Scleractinia
- **Familia:** Acroporidae
- **Género:** *Montipora*
- **Especie:** *Montipora capitata* (Dana, 1846), (WoRMS Editorial Board, 2022).

Características morfológicas:

“Las colonias de *M. capitata* tienen bases incrustantes, pero son arborescentes cuando están completamente desarrolladas. Las verrugas están espaciadas irregularmente y suelen estar fusionadas hacia las puntas de las ramas o los márgenes de las placas” (Veron et al., 2022).

Coloración:

Su coloración habitual suele ser marrón pálido con ciertas verrugas blancas. (Veron et al., 2022).

Hábitat:

Esta especie habita mayormente zonas de arrecife poco profundas y sustratos blandos (Veron et al., 2022).

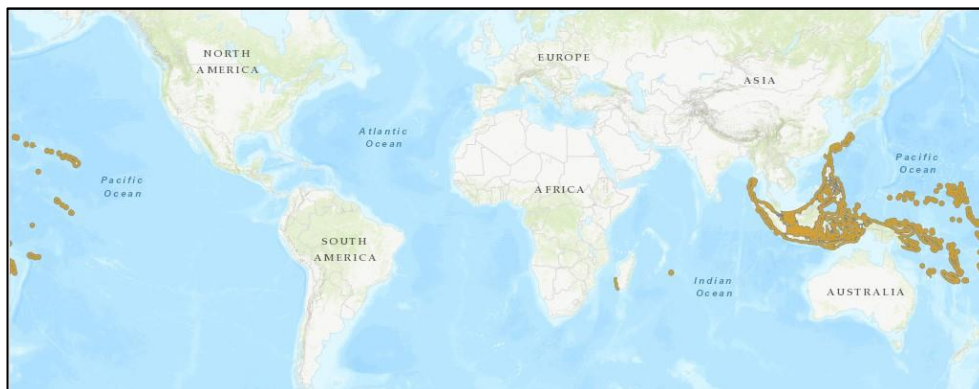
Distribución:

Figura. 5 Distribución mundial de la especie *M. capitata* (marrón). Fuente: IUCN, 2021.

Es una especie propia de la región Indo-oeste Pacífica, sin embargo, es muy común en el archipiélago Hawaiano, mientras que en el resto de la región es menos usual encontrarla (Briggs & Bowen, 2012; IUCN, 2021; Veron et al., 2022).

Photosynthetically Active Radiation (PAR) y su relación con los corales constructores de arrecifes.

Photosynthetically Active Radiation (PAR) o Radiación fotosintéticamente activa se define como el rango de longitudes de onda de la radiación electromagnética que puede utilizarse como fuente de energía para que se produzca actividad fotosintética en una célula fotoautótrofa (Mottus et al., 2013; Terashima et al., 2009). Este rango de radiación va de los 400nm a 700nm (Haukur Magnusson et al., 2007; Mottus et al., 2013; Terashima et al., 2009; Torregiani & Lesser, 2007). Sin embargo, éste se expresa en “densidad de flujo de fotones fotosintéticos” ya que la fotosíntesis es un proceso cuántico, y cuyas unidades se expresan en micromoles por metro cuadrado por segundo ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Mottus et al., 2013).

En este sentido el PAR es un factor muy importante cuando se habla de cría de corales, ya que su crecimiento depende en gran medida de la capacidad fotosintética de las algas endosimbiontes.

Existen estudios que analizan la importante presencia de microalgas endosimbiontes en los corales del género *Montipora* (Papina et al., 2003), objeto del presente estudio. La supervivencia y el crecimiento de los corales que forman estructuras de arrecife dependen en gran medida de la capacidad que tengan estas algas simbióticas intracelulares, llamadas comúnmente zooxantelas, para captar suficiente luz para realizar la fotosíntesis (Kinzie et al., 1984).

La luz es importante en una gran cantidad de funciones metabólicas de estos sistemas simbióticos entre las zooxantelas y los corales hospedadores, como es el caso de la calcificación, el aporte energético de las algas al huésped animal y el metabolismo de muchos de los nutrientes. Especialmente destacable es la relación entre la respiración animal que realizan los corales y la producción vegetal de oxígeno que llevan a cabo las zooxantelas, cuya función es claramente derivada de la acción de la luz. Así pues, el metabolismo a lo largo del día de los corales de arrecife parece seguir la tendencia que llevan los cambios en la intensidad de la luz (Kinzie et al., 1984; Papina et al., 2003).

Por este motivo, el PAR, es una variable muy influyente en el adecuado crecimiento de los corales, ya que un correcto PAR puede suponer una optimización de éste gracias a los procesos anteriormente mencionados como es el caso de la calcificación. Este último proceso es especialmente interesante ya que esta simbiosis se da en todos los corales tropicales constructores de arrecifes, cuyo efecto es que aquellos que poseen algas simbióticas se calcifican mucho más rápido en la luz que en la oscuridad, mientras que los corales que han perdido sus zooxantelas se calcifican a un ritmo más lento y no se ven afectados por la luz (Pearse & Muscatine, 1971), por lo que de algún modo la fotosíntesis que llevan a cabo dichas zooxantelas, produce mayores tasas de calcificación en sus hospedadores.

Sin embargo, el PAR no es el único factor que influye en el crecimiento de estos organismos, existiendo otros parámetros que también afectan como es el caso de la temperatura, salinidad, concentración de compuestos nitrogenados, fosfatos, pH (Atkinson et al., 1995; Ernst et al., 2011) y los diferentes elementos traza y sales disueltas que encontramos en el agua como sería el magnesio, el calcio y los carbonatos (Riddle, 2008; Small & Adey, 2001).

Crecimiento de los corales y técnicas de medida.

La medición cuantitativa de los corales no se ve definida por una metodología concreta, ya que se puede ver que en diferentes estudios utilizan técnicas distintas. Todas estas técnicas tienen ventajas y desventajas, y su efectividad es dependiente del tipo de coral que se pretende medir. Esto se debe a que cada especie de coral tiene un tipo de cinética de crecimiento diferente (Leal et al., 2016), de hecho, dentro de una misma especie ciertos individuos tienen cinéticas de crecimiento diferentes, e incluso un mismo individuo puede experimentar variación en su cinética de desarrollo con el paso del tiempo.

Hay metodologías que están establecidas desde hace décadas, como es el caso de la técnica de medición por peso boyante (Jokiel et al., 1978), donde se mide el crecimiento total del esqueleto de aragonito de una pieza de coral mediante un dinamómetro. Sin embargo, la técnica es insensible al crecimiento de los tejidos blandos del coral, el agua que pueda quedar entre los poros del esqueleto del individuo o los comensales que pueda alojar la pieza. Al tener que hacer estas asunciones, en ciertos casos se deberá prescindir de esta técnica, sin embargo, tiene ventajas considerablemente significativas como para tenerla en cuenta: simplicidad, coste reducido del material necesario, alta precisión en la medida del incremento de masa del

aragonito en corales vivos y lo poco destructivo que es para los individuos que se les aplique la técnica (Jokiel et al., 1978).

Otra de las metodologías más comunes es la medida del crecimiento del coral mediante la distancia lineal (de las ramificaciones o del diámetro), la cual se utiliza comúnmente en la medición de corales con una cinética de crecimiento linear ramificada o cinética de crecimiento en disco (Kinzie III & Sarmiento, 1986; Leal et al., 2016), ya que, con otro tipo de corales con un crecimiento más irregular, esta técnica sería algo más complicada de utilizar.

Actualmente, una de las metodologías más utilizadas es la de la fotogrametría para el modelado en 3 dimensiones (Lange & Perry, 2020), caracterizada por lo poco invasiva que es para los colares, la sencillez y rapidez de la obtención de resultados, y la precisión que aporta, pero hoy en día llevarla a cabo puede resultar costoso a causa del equipamiento especializado necesario.

Esta técnica no es totalmente nueva ya que deriva de otras que llevan tiempo utilizándose, sin embargo, sí que ha evolucionado gracias al avance tecnológico que se ha producido en las últimas décadas. Surge de técnicas como la radiografía de corales mediante rayos X (Baker & Weber, 1975; Buddemeier et al., 1974), más utilizada antiguamente para el control del crecimiento y dinámica de los arrecifes, y la fotometría (Page et al., 2018), basada en el cálculo del área de ocupación del coral y la comparación de éstas con el tiempo.

En el presente estudio, se han considerado las diferentes opciones consultadas para elaborar una metodología adecuada al experimento realizado. Se consideraron los diferentes factores que podrían afectar a los individuos a la hora de ejecutar la medición y el tipo de datos que se pretendía obtener, dando origen al planteamiento de una metodología propia basada en el peso húmedo de los corales.

Esta técnica se caracteriza por el bajo coste que supone su ejecución, la simplicidad de muestreo y por la reducción del daño y estrés causado a los corales en el momento de medirlos. A la hora de plantearla también se tuvo en cuenta la cinética de los corales objeto de estudio, *M. digitata* y *M. capitata*, caracterizados por desarrollar formas arborescentes e irregulares, por lo que la metodología está diseñada de manera que los datos obtenidos sean de peso.

Esta metodología considera ciertas premisas basadas en sus características y en estudios con metodologías similares. Esta asunción corresponde a que se entiende que el peso del tejido blando del coral y las posibles secreciones que pueda expulsar, tienen una densidad muy similar a la del medio en el que se encuentra, aportando a estos componentes una flotabilidad neutra que no afecte al peso que se está midiendo (Jokiel et al., 1978).

OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es comparar el crecimiento de dos especies del género *Montipora* y los diferentes valores de *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) al cual están sometidas, con el fin de establecer un rango óptimo de este parámetro para la acuicultura *ex situ* de estas especies.

Con esta finalidad se han establecido los siguientes objetivos secundarios:

- Estudiar el crecimiento de las especies de coral *M. digitata* y *M. capitata* en las condiciones controladas en su cultivo *ex situ*.
- Analizar las tasas de crecimiento de cada especie en función de las condiciones a las que se han sometido las piezas en el experimento.

MATERIAL Y METODOS

El ensayo se llevó a cabo entre el día 1 de marzo de 2022 hasta el 26 de abril de 2022, periodo durante el cual se recogieron datos mediante la metodología establecida dos veces a la semana de manera continuada (martes y viernes).

La metodología empleada para llevar a cabo este estudio se puede dividir en diferentes apartados ya que el proceso de preparación del experimento abarca desde la puesta a punto del esquejero para el cultivo de corales hasta el tratamiento estadístico de los datos, pasando por el mapeado del PAR en el acuario, el esquejado de las piezas de coral utilizadas, el montaje de la infraestructura del experimento y la técnica de medida del peso de éstos para monitorizar su crecimiento.

Preparación, mantenimiento y gestión del tanque de cría de corales.

Preparación y ciclado del acuario

En primer lugar, para la puesta a punto del experimento se recurrió a un acuario con características que le permitieran albergar un cultivo de corales. En este caso se contó con una urna rectangular de cristal de dimensiones 150cm x 60 cm x 50cm, cuya capacidad era de aproximadamente 450 litros junto con una secundaria de 100 litros que actúa como sumidero o *sump* donde cae el agua del acuario y recibe los distintos tratamientos mecánicos, químicos y físicos para su retorno a la urna principal en las condiciones óptimas para el mantenimiento de los seres vivos que se encontraban en ella (Figura. 6).

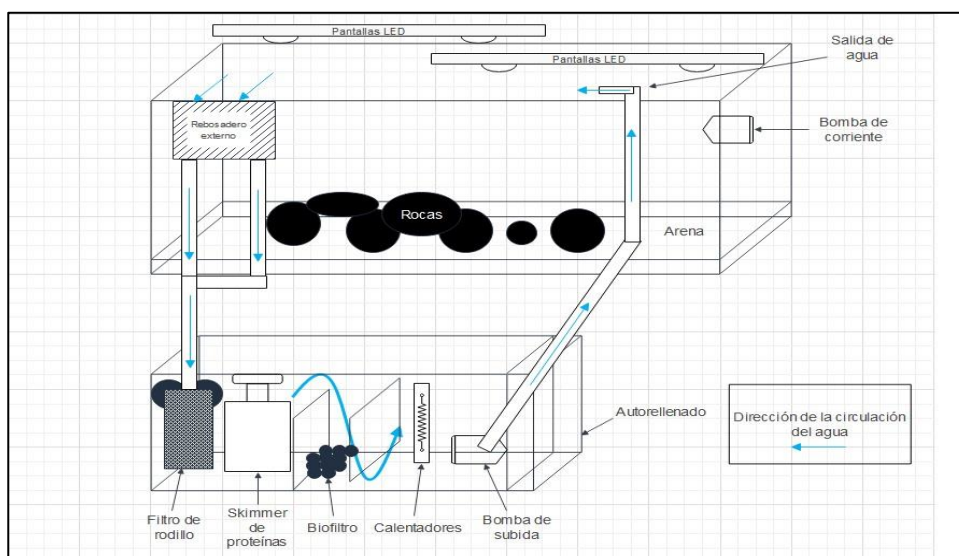


Figura. 6 Esquema del sistema confeccionado para el desarrollo del experimento. Fuente: Elaboración propia.

Para el adecuado funcionamiento de este sistema con doble urna, se contó con un rebosadero externo Over Flow 3000L/h (BLAU aquaristics), que permitía el paso del agua de la urna principal al filtro mecánico de rodillo Reef-Roller Manual M 3000L/h (TMC aquarium), situado en la urna secundaria, cuya función era retener con un rollo filtrante 45m Filter Roll (TMC aquarium) todas aquellas partículas en suspensión de un tamaño mayor a 50 μm , concluyendo así con el primer tratamiento del agua. A continuación, el agua pasaba por los diferentes compartimentos del *sump*, en los cuales experimentaba diferentes procesos para su adecuación: retirada de materia orgánica disuelta mediante el skimmer de proteínas Reef-Skim 1000 (TMC aquarium), transformación de diferentes compuestos disueltos en el agua (nitratos, amoníaco, fosfatos, etc.) potencialmente dañinos mediante las colonias de bacterias ubicadas en el filtro biológico, adecuación térmica a la temperatura establecida mediante los calentadores Vtherm 300 Digital Heater (TMC aquarium) y adecuación de la salinidad mediante el aporte de agua de osmosis mediante un autorellenador de boya DC pump 200L/h (TMC aquarium), ya que debido a la evaporación, el agua tiende a aumentar la concentración de sales disueltas pudiendo provocar desequilibrios osmóticos en los organismos.

Una vez terminado el tratamiento, el agua retorna a la urna principal mediante una bomba de subida Reef Pump 4000L/h (TMC aquarium). Cerrándose así el ciclo que recorre el agua dentro de este sistema cerrado.

Dentro de la urna principal, hay ubicados varios elementos de importancia que contribuyen a proporcionar unas condiciones adecuadas para el crecimiento de los corales. En primer lugar, las bombas de corriente Reef Tide DC Pump 16000L/h (TMC aquarium), las cuales permiten que haya una circulación constante de agua además de proporcionar un efecto similar al del oleaje. Estos efectos simulados son necesarios ya que son muy beneficiosos para el crecimiento de las especies del género *Montipora* utilizadas para el experimento (McClanahan et al., 2005).

Otro de los elementos que encontramos ubicados en la urna principal, son los paneles de luz AquaMedic Acuaris 90 (AquaMedic) controlados por el controlador AquaMedic acuaris control (AcuaMedic), que en este caso son fundamentales para el estudio realizado, ya que aportaron la luz necesaria para el crecimiento de los corales ya que la iluminación es necesaria para la adecuada calcificación de los corales en la que influyen los simbiosis fotosintéticos de los corales conocidos como zooxantelas (Pearse & Muscatine, 1971). También se debe destacar la importancia de la iluminación

para el experimento ya que la variable independiente completada es el *Photosynthetically Active Radiation* (PAR), la cual en función de sus variaciones se utilizó para medir la tasa de crecimiento de los esquejes de las especies de *Montipora*.

Por último, dentro de la urna principal se introdujeron una serie de especies funcionales aptas para las condiciones del acuario de cría que se ha diseñado para el experimento: *Amphiprion ocellaris* (Cuvier, 1830), *Halichoeres melanurus* (Bleeker, 1851), *Macropharyngodon bipartitus* (Smith, 1957), *Synchiropus splendidus* (Herre, 1927), *Trochus histrio* (Reeve, 1842), *Siganus vulpinus* (Schlegel & Müller, 1845), *Salarias fasciatus* (Bloch, 1786), *Ctenoides ales* (Finlay, 1927), *Conomurex luhuanus* (Linnaeus, 1758), *Archaster typicus* (Müller & Troschel, 1840); cuya función general en el acuario es aumentar la carga biológica del sistema con el fin de mantenerlo en un equilibrio estable. Sin embargo, algunas especies tenían funciones más especializadas, por ejemplo, *Siganus vulpinus* (Schlegel & Müller, 1845) se utilizó para mantener controlados los *blooms* algales que pudieran aparecer en el acuario; esto fue posible gracias a su dieta herbívora centrada en las algas (Hoey et al., 2013).

Para asegurar el bienestar de los animales introducidos, se les proporcionó lugares de refugio a través de la instalación de un lecho arenoso y rocas naturales. Estas mismas rocas, al ser naturales ya contaban con sus propias colonias bacterianas que servían como biofiltro para el acuario; sin embargo, se observaron efectos negativos al contener algas resistentes que proliferaron en el acuario desestabilizando en repetidas ocasiones el estado óptimo alcanzado, a pesar del previo baño en peróxido de hidrógeno.

Previo al funcionamiento del sistema cerrado, descrito anteriormente, se llevó a cabo el proceso de “ciclado” del acuario. Éste se refiere a la sucesión de colonias de bacterias necesarias para su correcto funcionamiento, con el objetivo de prevenir y atenuar los efectos que puedan derivarse de las perturbaciones del ambiente del acuario (Bik et al., 2019).

Este proceso se llevó a cabo durante un total de 6 semanas, donde el sistema del acuario contaba con todos los elementos de funcionamiento anteriormente mencionados (calentadores, filtros, etc.) y el agua en las condiciones establecidas para el experimento, pero sin ningún organismo dentro de la urna principal a excepción de dos ejemplares de *Amphiprion ocellaris* (Cuvier, 1830), con la intención de aportar algo de carga biológica para el ciclado del acuario. A partir de este punto se dosificaron diariamente 50 ml del coctel bacteriano comercial Stability (Seachem) y una ampolla de

BioDigest de Prodigio (*Nitrosomonas europaea* y *Nitrobacter winogradskyi*) a la semana para ir provocando paulatinamente la sucesión bacteriana necesaria.

Una vez completadas las 6 semanas de ciclado, se fueron incluyendo poco a poco el resto de los organismos, dejando de una a dos semanas entre la aclimatación de nuevos individuos, siendo los corales los últimos en ser incorporados al acuario.

Las aclimataciones de los peces, equinodermos y moluscos consistían en una adaptación térmica previa, llevada a cabo mediante la suspensión en el acuario de las bolsas de transporte de los individuos, y posteriormente, una aclimatación química lograda mediante la mezcla por goteo del agua presente en la bolsa de transporte y la del acuario a lo largo de 40 minutos. Una vez transcurridos los minutos establecidos, mediante salabres se recogían uno a uno los diferentes organismos y se introducían cuidadosamente en la urna principal.

La aclimatación de las piezas de coral se realizó de la misma forma que en el caso anteriormente descrito, sin embargo, previo a su introducción al sistema, las piezas se bañaron en una solución de 5 litros de agua del propio acuario y 20 ml de lugol (yoduro potásico), para eliminar cualquier parasito que pudieran haber traído del criadero del proveedor.

Parámetros y condiciones del acuario

Los parámetros se eligieron para el experimento en consecuencia al tipo de corales estudiados, en este caso del género *Montipora*. A partir de esta pauta se han revisado varios trabajos y recomendaciones de productos específicos, que han sido dosificados durante el experimento y condiciones de acuarios especializados en arrecifes de coral que contuvieran las especies estudiadas.

Los parámetros que se han considerado de importancia para el estudio y se ha tratado de mantener constantes en el tiempo han sido: Temperatura (°C), salinidad (ppm), Nitratos (NO_3^- , mg/L), Fosfatos (PO_4^{3-} , mg/L) y pH. Estos parámetros, son considerados como básicos, y se deben monitorizar en cualquier acuario (Atkinson et al., 1995; Ernst et al., 2011).

Por otro lado, también se ha analizado periódicamente la concentración de calcio (Ca, mg/L), magnesio (Mg, mg/L) y la alcalinidad o dureza de carbonatos (KH, dH/L), sin embargo, estos componentes se aportaban con la dosificadora a partir de soluciones comerciales y en función del consumo que había en el acuario. Éstos, son de gran

importancia en los acuarios donde se instalen corales duros como es el caso de este experimento, ya que las concentraciones de estos compuestos influyen en el crecimiento de las *Montipora* utilizadas (Riddle, 2008; Small & Adey, 2001).

Temperatura

La temperatura establecida para el experimento se basó en la información extraída de otros estudios y acuarios en los que trabajasen con especies de corales indo-pacíficos tropicales como es el caso de las del género *Montipora*.

El rango de temperaturas aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si la temperatura medida en el acuario salía de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta.

Consigna: Temperatura ente 24.0°C y 26,0°C (Ernst et al., 2011; Small & Adey, 2001).

Salinidad

La salinidad establecida para el experimento se basó en la información extraída de otros estudios y acuarios en los que tratasen con especies de corales indo-pacíficos tropicales como es el caso de las del género *Montipora*.

El rango de salinidad aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si la salinidad medida en el acuario salía fuera de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta.

Consigna: Salinidad ente 32ppm y 34ppm (Ernst et al., 2011).

Compuestos nitrogenados

- **Amoniaco (NH₃)**

La concentración de amoníaco establecida para el experimento se basó las indicaciones del fabricante (Seachem) del test indicador de amoníaco The One Year Alert Combo.

Se ha medido ya que el amoníaco es toxico para la gran mayoría de los seres vivos, y en caso de tener amoníaco en el acuario del experimento podría causar estragos en los animales, incluso la muerte (Sánchez Ortiz, n.d.).

El rango de concentración aceptable se estableció mediante la consigna establecida por el fabricante, a partir de la cual, si la concentración de amoníaco medida en el acuario salía de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta.

Consigna: $[\text{NH}_3]$ inferior a 0,02ppm (indicación del fabricante Seachem).

- **Nitratos (NO_3^-)**

La concentración de nitratos establecida para el experimento se basó en la información extraída de otros estudios y acuarios.

Se ha medido ya que los nitratos son tóxicos en concentraciones elevadas para la gran mayoría de los seres vivos, y en caso de un exceso de nitratos en el acuario del experimento podría causar estragos en los animales, incluso la muerte.

El rango de concentración de nitratos aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si la concentración de nitratos medida en el acuario salía fuera de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta.

Consigna: $[\text{NO}_3^-]$ inferior a 3 mg/L (Pucheu et al., 2006).

Fosfatos (PO_4^{3-})

La concentración de fosfatos establecida para el experimento se basó en la información extraída de otros estudios y acuarios en los que tratasen con especies de corales indo-pacíficos.

El fosfato puede afectar negativamente a los corales, modificando las tasas de crecimiento, la densidad del esqueleto, la reproducción, la mortalidad y las zooxantelas, por eso se consideró adecuado medir periódicamente sus niveles (Dunn et al., 2012).

El rango de concentración de fosfatos aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si los fosfatos medidos en el acuario salían fuera de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta.

Consigna: $[\text{PO}_4^{3-}]$ inferior a 0,06 mg/L (Tanaka et al., 2010).

pH

El pH establecido para el experimento se basó en la información extraída de otros estudios y acuarios con especies de corales indo-pacíficos tropicales como es el caso de las del género *Montipora*.

El rango de pH aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si el pH medido en el acuario salía de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta.

Consigna: pH ente 7,9 y 8,3 (Ernst et al., 2011; Small & Adey, 2001).

Calcio (Ca)

El Calcio contempló debido a que es un compuesto que utilizan los corales como componente importante de su estructura esquelética y de su sistema de soporte mecánico (Drazenovic & Fagan, 2015).

La concentración de calcio establecida para el experimento se basó en las indicaciones del fabricante (TropicMarin) de los suplementos minerales que se le han aportado al acuario para el correcto crecimiento de los corales (All-For-Reef Powder y Original Balling Componets).

El rango de calcio aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si el calcio medido en el acuario salía fuera de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta

Consigna: [Ca] entre 400mg/L y 450mg/L.

Magnesio (Mg)

El Magnesio se ha medido puesto que es un compuesto esencial en la química inorgánica que se produce en el agua. Los niveles elevados de magnesio suprimen la precipitación abiótica del carbonato de calcio y evitan que las concentraciones de calcio y carbonato sean demasiado bajas para el crecimiento de los corales (Drazenovic & Fagan, 2015).

La concentración de magnesio establecida para el experimento se basó en las indicaciones del fabricante (TropicMarin) de los suplementos minerales que se le han aportado al acuario para el correcto crecimiento de los corales (All-For-Reef Powder y Original Balling Componets).

El rango de magnesio aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si el calcio medido en el acuario salía de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta

Consigna: [Mg] entre 1250mg/L y 1400mg/L.

Alcalinidad (Dureza de carbonatos)

Los carbonatos se tuvieron en cuenta debido a que son una fuente vital de carbono inorgánico utilizado en la fotosíntesis por las zooxantelas simbióticas de los corales. Alternativamente, los carbonatos se utilizan en la formación de la estructura esquelética del coral a través de la precipitación biótica de aragonito. (Drazenovic & Fagan, 2015).

La alcalinidad para el experimento se basó en las indicaciones del fabricante (Salifert) del test (KH/Alk Profi Test) utilizado para medir este parámetro.

El rango de alcalinidad aceptable se estableció mediante una consigna, a partir de la cual, si la alcalinidad/KH medido en el acuario salía de rango, se consideraba como irregular, y era motivo de alerta

Consigna: KH/Alk entre 7dKH y 8dKH.

Fotoperiodo

El fotoperiodo establecido para el experimento se mantuvo con las pantallas de luz AquaMedic Acuaris 90 (AquaMedic) encendidas durante 12 horas al día, con su respectivo amanecer y atardecer, a la intensidad marcada por el espectro completo del PAR que se pretendía conseguir para el experimento, en este caso al 80% del máximo (95W/6240lm).

Gestión y mantenimiento del acuario

Revisión y mantenimiento

Para el mantenimiento diario del acuario se llevaban a cabo una serie de revisiones rutinarias, en las que se comprobaba el estado tanto de los sistemas como de los organismos vivos que había en el acuario.

En primer lugar, se revisaba el estado y buen funcionamiento de los sistemas que hacen funcionar el ciclo del acuario siguiendo las pautas descritas en el Anexo I. En este caso se revisa de manera exhaustiva que el agua rebose correctamente por el rebosadero externo Over Flow 3000L/h (BALU aquaristics) y caiga en el filtro de rodillo Reef-Roller Manual M 3000L/h (TMC aquarium), a continuación, se revisaba el correcto funcionamiento del Reef-Skim 1000 (TMC aquarium) y su estado de limpieza, si era deficiente se desechaba el agua que contenía el copo del skimmer, se extraía esta pieza y se limpiaba con agua dulce.

El siguiente paso de esta revisión era controlar si los calentadores Vtherm 300 Digital Heater (TMC aquarium) funcionaban correctamente y estaban totalmente sumergidos.

A continuación, se revisaban todas las bombas que intervenían en el correcto funcionamiento del acuario, tanto la de subida Reef Pump 4000L/h (TMC aquarium) como las bombas de corriente Reef Tide DC Pump 16000L/h (TMC aquarium) que hacían circular el agua en la urna principal.

Por último, se comprobaba el funcionamiento de las pantallas de luz AcuaMedic acuarius 90 y el nivel del aljibe del depósito de autorellenado de agua de osmosis, que si estaba por debajo del 25% de su capacidad se rellenaba con agua osmotizada obtenida con el Aquili Osmosis filter de 4 etapas (Aquili).

La segunda revisión diaria de mantenimiento consistía en revisar la parte viva del acuario siguiendo las pautas marcadas en el Anexo II. En primer lugar, se alimentaba con comida congelada de propia elaboración (cubos congelados de 5 gramos de papilla de mejillón, calamar, merluza, Selco S. presso (INVE) y Easyroti (EasyReefs)), y a continuación se controlaba que todos comían y estaban en buen estado.

Además, se controlaba el estado de los corales objeto del experimento y su grado de limpieza, que si no era el adecuado se les quitaban las algas y otros elementos que pudieran afectar a su correcto crecimiento.

Por último, se revisaban posibles problemas y acontecimientos inusuales. La mayoría de éstos, estaban relacionados con *blooms* algales y de dinoflagelados, frente a los cuales se dosificaban productos para paliarlos. En este caso, frente a *blooms* de dinoflagelados según recomendación del fabricante se dosificaban 25 ml, cada tres días durante un total de 3 semanas, de DINO X (Fauna Marin) para erradicar la plaga. En el caso de *blooms* algales, según recomendación del fabricante se dosificaba durante un total de 3 semanas 14 ml de Algal Clean Out (FRITZ) cada 3 días para erradicar la aparición de éstas en el acuario.

Test y control de parámetros

Semanalmente se llevaban a cabo una serie de pruebas con intención de controlar la estabilidad de los parámetros del acuario. Estas pruebas se realizaban con test comerciales específicos de cada parámetro a controlar, o en el caso de la

temperatura y salinidad con instrumental de medida especializado, y se anotaban en las tablas de datos especificadas en el Anexo III.

- Temperatura: Se media diariamente mediante el indicador de temperatura integrado en los calentadores Vtherm 300 Digital Heater (TMC aquarium). Unidades: °C.
- Salinidad: Se media diariamente mediante un refractómetro de salinidad Portable Refractometre (Autoulet). Unidades: ppm.
- Alcalinidad: Se media 3 veces por semana (lunes, miércoles y viernes) mediante el test comercial KH/Alk Profi Test (Salifer). Unidades: dKH.
- Magnesio: Se media 2 veces por semana (lunes y viernes) mediante el test comercial Mg Profi Test (Salifer). Unidades: mg/L.
- Calcio: Se media 2 veces por semana (lunes y viernes) mediante el test comercial Ca Profi Test (Salifer). Unidades: mg/L.
- Nitratos: Se media 2 veces por semana (martes y jueves) mediante el test comercial Visocolor ECO Nitrat Test 5-41 1-120 mg/L (Macherey-Nagel) y el fotómetro Compact Fotometer PF 12 Plus (Macherey-Nagel). Unidades: mg/L.
- Fosfatos: Se media 2 veces por semana (martes y jueves) mediante el test comercial Visocolor ECO Phosphat Test 5-84 0.2-5 mg/L (Macherey-Nagel) y el fotómetro Compact Fotometer PF 12 Plus (Macherey-Nagel). Unidades: mg/L.
- pH: Se media mensualmente, o en caso de inestabilidad del acuario con el test comercial pH Profi Test (Salifer).
- Amoniaco: Se revisaba diariamente la pegatina del amoníaco The One Year Alert Combo (Seachem) con la intención de comprobar que el nivel de amoniaco estaba por debajo de la consigna.

Dosificación

Para el correcto crecimiento de los corales se dosificaron soluciones enriquecedoras de minerales mediante la dosificadora Reefdoser EVO 4, 4-channel dosing pump (AquaMedic).

La solución enriquecedora utilizada fue All-For-Reef (TropicMarin), aportando calcio, magnesio, KH y elementos traza. Diariamente se dosificaba según las indicaciones del fabricante un total de 12.5 ml, sin embargo, al llevar a cabo los tests de

magnesio, calcio y KH, la dosis se ajustaba dependiendo de la concentración medida en el agua del acuario con tal de no sobresaturarla y provocar desequilibrios en el sistema.

Cambios de agua

Cada dos semanas o cuando las concentraciones de alguno de los parámetros químicos eran demasiado altas, y especialmente la de nitratos o amoníaco, se procedía a realizar un cambio parcial del agua del acuario, con la intención de reducir la concentración de éstos y así evitar problemas por concentraciones excesivas.

Cuando se realizaban estos cambio de agua, mediante una bomba Reef Pump 4000L/h (TMC aquarium) se extraía de la urna del *sump*, con el sistema parado y sin circulación, el equivalente a un 10%-20% del volumen total del sistema (entre 50 y 100L) y se desechaba. A continuación, el volumen retirado era remplazado por agua salada de propia elaboración. El volumen aportado era equivalente al retirado.

Se elaboraba agua de mar artificial a partir de 100L de agua osmotizada producida por el sistema de osmosis Aquili Osmosis filter de 4 etapas (Aquili) y la cantidad necesaria de sal Pro-reef (TropicMarin) para que el agua elaborada alcanzase la salinidad medida en el acuario (entre 32 y 34 ppm).

Una vez finalizado el cambio de agua, se encendían nuevamente todos los sistemas y se comprobaba el buen funcionamiento de estos y el estado de los organismos vivos que habitaban el acuario.

Microesquejado de las piezas de Montipora.

Los corales utilizados en el experimento, pertenecientes al género *Montipora*, elegido por su crecimiento lo suficientemente rápido como para detectar variaciones semanales (Browne, 2012; Heyward & Collins, 1985) mediante la técnica de muestreo utilizada en el estudio. Concretamente, las especies utilizadas en el experimento correspondían a *Montipora digitata* y *Montipora capitata*, al ser dos especies del género mencionado y relativamente fáciles de conseguir.

Para obtener los esquejes de coral necesarios para el experimento, se llevó a cabo la técnica de microfragmentación (Page et al., 2018), con la cual se obtuvieron 9 fragmentos de entre 1 y 3 gramos de cada una de las especies, a partir de piezas de un mayor tamaño de estas especies (aprox. 300g).

El proceso de obtención de los fragmentos comenzó al aclimatar las piezas madre de las especies utilizadas. Una vez aclimatadas se dejaron acostumbrarse a las condiciones de su nuevo hábitat durante un total de 3 días. Una vez transcurrido este tiempo se procedió al microesquejado de las piezas.

En primer lugar, se prepararon dos urnas con un volumen de 5 litros cada una, las cuales se llenaron con agua del propio acuario. A una de ellas se le añadieron un total de 20 ml de lugol y la otra se mantuvo en las mismas condiciones que la del acuario.

A continuación, se extrajo la pieza madre de una de las especies y se bañó durante 1 minuto en la urna con lugol, y a continuación se procedió a colocarla sobre un mantel de papel de filtro y comenzó la fragmentación de la pieza mediante la Mini herramienta eléctrica con cable Dremel modelo 3000 con hojas de 38mm Dremel EZ SpeedClic SC456B, intentando dañarla lo menos posible cortando fragmentos de las puntas de la pieza.

Una vez, se obtuvieron los esquejes de la pieza grande se bañaron en la urna con lugol durante 2 minutos y a continuación se trasladaron a la urna con agua del acuario donde transcurridos otros 2 minutos se sacaban y se pegaban mediante cianoacrilato en gel en las bases previamente pesadas (elaboración propia: 66% arena de coral fina y 33% cemento portland) con su correspondiente código de identificación en función de la especie y ubicación en la instalación del experimento.

Una vez, las piezas estaban bien pegadas se colocaban en su lugar correspondiente dentro del acuario principal; a continuación, se realizaba el mismo proceso con la otra especie hasta tener todas las piezas necesarias para el experimento.



Figura. 7 Ejemplo del resultado de una de las piezas tras el microesquejado de los corales utilizados para el estudio. Fuente: Elaboración propia.

La porción de las piezas grandes de cada especie una vez bañadas durante 5 minutos en lugol, fue devuelta al acuario principal para mantenerlas y tener un respaldo en el caso de que alguno de los esquejes no sobreviviera de la manera correcta.

Medición del *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) e instalación del experimento.

Para la instalación de todos los componentes de soporte del experimento, en primer lugar, se llevó a cabo la medida del PAR en el acuario y se obtuvo el mapa correspondiente.

En primer lugar, se dividió la superficie del acuario en cuadrados de 10cm de lado. En cada uno de estos, se tomó la medida del PAR a una profundidad de 10 cm (profundidad cómoda para trabajar y con una corriente adecuada para las necesidades de los corales utilizados) mediante el medidor de PAR Seneye Reef (Seneye). Una vez apuntadas las medidas del PAR en cada uno de los cuadrados, se procesaron mediante el software Surfer (Golden Software, 2020) con el cual se elaboró un mapa del PAR (Figura.7) de la zona donde se instalarían las rejillas de soporte para las piezas de coral.

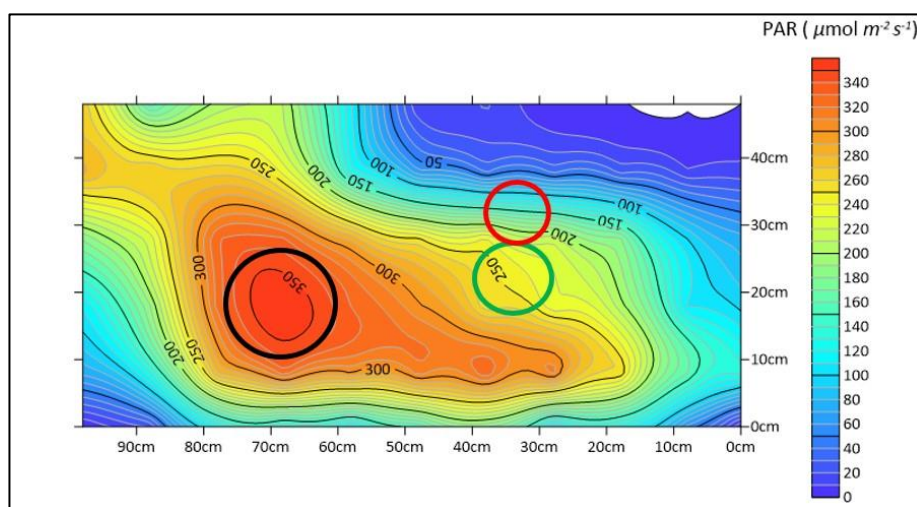


Figura. 8 Mapa de los niveles de PAR en la zona del acuario del experimento (lado derecho, 10 cm de profundidad). Las zonas de PAR establecidas son $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (círculo rojo), $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (círculo verde) y $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (círculo negro). Fuente: Elaboración propia.

Una vez elaborado el mapeado del PAR del acuario, se procedió a instalar las rejillas donde se colocaron las bases que contenían los esquejes de coral. Estas rejillas se sujetaban a la profundidad y en la zona del acuario correspondiente mediante unas bridas sujetas a tubos de PVC adheridos con ventosas a las paredes de la urna tal y como se muestra en la Figura. 8.

La zona donde se colocaron cada una de las tres rejillas se eligió basándose en el mapa del PAR elaborado y correspondía a la zona donde este era igual al establecido para el experimento (Figura. 7). Las zonas donde se instalaron las rejillas eran las zonas con valores de PAR de $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, los cuales se seleccionaron basándose en las referencias de otros experimentos y criadores ornamentales de corales *ex situ* (Haukur Magnusson et al., 2007; Kinzie, 1993; Page et al., 2018; Riddle, 2008; Rocha et al., 2013; Thein, 2019; Torregiani & Lesser, 2007).

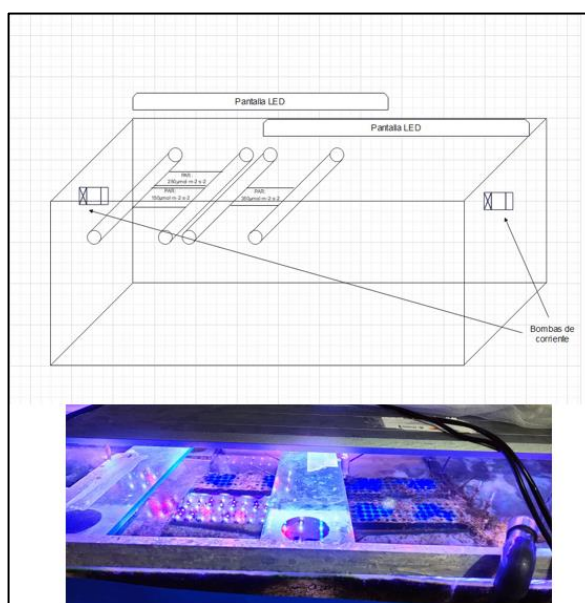


Figura. 9 Esquema e imagen de la infraestructura confeccionada para la colocación de los esquejes durante el desarrollo del experimento. Fuente: Elaboración propia.

Por último, cabe destacar que, para la correcta identificación de cada una de las piezas, se codificaban según la especie y zona de PAR en la que estaban colocadas (Figura. 9). En cada una de las zonas, había 3 piezas de cada una de las dos especies, diferenciadas entre si mediante un código de color marcado en la base con una brida. De manera que cada una de las piezas tenía un color específico para diferenciarla de las de las de su misma especie dentro de cada zona de PAR (ej. 150DIG1V, donde 150 es el PAR de la zona en la que se ubicaba, DIG hace referencia a la especie (DIG:

M. digitata, CAP: *M. capitata*) y 1V al color de la brida de su base (1V: verde, 2N: negro, 3B: blanco)).

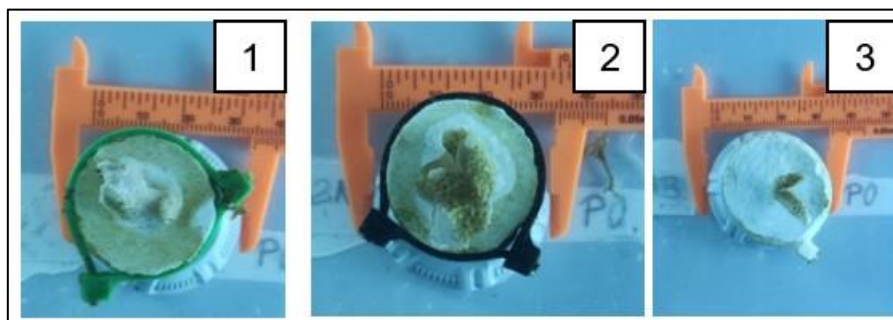


Figura. 10 Ejemplos de la codificación para distinguir las piezas utilizadas en el experimento (Ej: 1- 150CAP1V, 2- 150CAP2N, 3- 150DIG3B). Fuente: Elaboración propia.

Técnicas de medida del crecimiento de los fragmentos de coral.

Para la recogida de datos sobre el crecimiento de corales en el presente estudio, se ha elaborado una técnica novedosa que se repetía dos veces por semana para controlar la tasa de crecimiento de los corales (martes y viernes).

La metodología se planteó de tal manera que en el momento de la toma de datos la pieza de coral sufra el menor estrés posible dejándola sumergida en todo momento durante el proceso de pesado.

En primer lugar, se extrajeron del acuario las piezas de tres en tres para evitar que estuvieran fuera de su hábitat el menor tiempo posible. Se trasladaban en una jarra de plástico de 1,5L llena de agua del propio acuario hasta la balanza de precisión XSbalance BL 224 basic con un error de 0,001g (XS instruments), donde primeramente se colocaba un vaso de plástico de 100ml y se llenaba con 50g de agua del.

Una vez colocado, se sacaba de la jarra una de las piezas de coral y se dejaba gotear hasta que parase (aprox. 3 segundos), se introducía en el vaso con agua, se mantenía sumergido y en suspensión con ayuda de unas pinzas, y a continuación se taraba el vaso. Posteriormente, se soltaba la pieza en el vaso y se dejaba caer hasta el fondo, donde una vez detectado el peso se recogía el dato.

Una vez tomada la medida, se devolvía la pieza pesada a la jarra y se taraba nuevamente antes de pesar la siguiente mediante el mismo proceso. Éste se repetía hasta completar la toma de datos de las 18 piezas del estudio.

Tratamiento estadístico de datos.

Para el tratamiento de los datos extraídos del experimento se han utilizado varios programas especializados en análisis estadísticos de datos.

El primero de ellos ha sido el software de Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2021), el cual se ha utilizado sobre todo para la recogida de datos, cálculos, elaboración de ciertas gráficas y el tratamiento de estos datos para el posterior análisis estadístico.

También se ha utilizado el programa RCommander V2.7-1 (Fox & Bouchet-Valat, 2022) para todo el análisis estadístico necesario de los datos. Con este programa se han elaborado las distintas pruebas y figuras de los resultados. Las pruebas realizadas con este programa fueron: prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors, prueba de Levene y la prueba ANOVA bifactorial.

Por último, se utilizó el programa IBM SPSS Statistics (IBM Corp., 2020) para la elaboración de ciertos gráficos por razones de claridad en estos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento en condiciones artificiales

Las condiciones físico-químicas para el mantenimiento del sistema que contenía los ejemplares de *M. digitata* y *M. capitata* durante la fase de experimentación son las que se describen en la Tabla 1. Estos valores presentaron alguna variación puntual durante el transcurso de los experimentos ajena al control de este (Anexo V), sin embargo, no fueron condicionantes en el momento de extraer los resultados globales del estudio.

Tabla. 1 Consignas establecidas para los parámetros controlados durante el ensayo.

Parámetro	Consigna
Temperatura	24-26 °C
Salinidad	32-34 ppm
NH ₃	<0,02 ppm
NO ₃ ⁻	<3 mg/L
PO ₄ ³⁻	<0,06 mg/L
pH	7,9-8,3
[Ca]	400-450 mg/L
[Mg]	1250-1400 mg/L
KH/Alk	7-8 dKH

Como se puede observar en la Figura. 11, todos los ejemplares utilizados en el ensayo han experimentado un aumento del peso con el tiempo, excepto en algún caso particular donde se ha reducido su peso. Sin embargo, esta reducción en el peso no es debida a un decrecimiento del propio coral, sino que, a causa de la manipulación de las piezas, éstas se despegaron de su base, y al pegarlas nuevamente, el peso del pegamento ha sido inferior al inicial. A pesar de estos eventos, posteriormente a la nueva unión a la base, como se puede observar en la Figura. 11, las piezas han continuado creciendo.

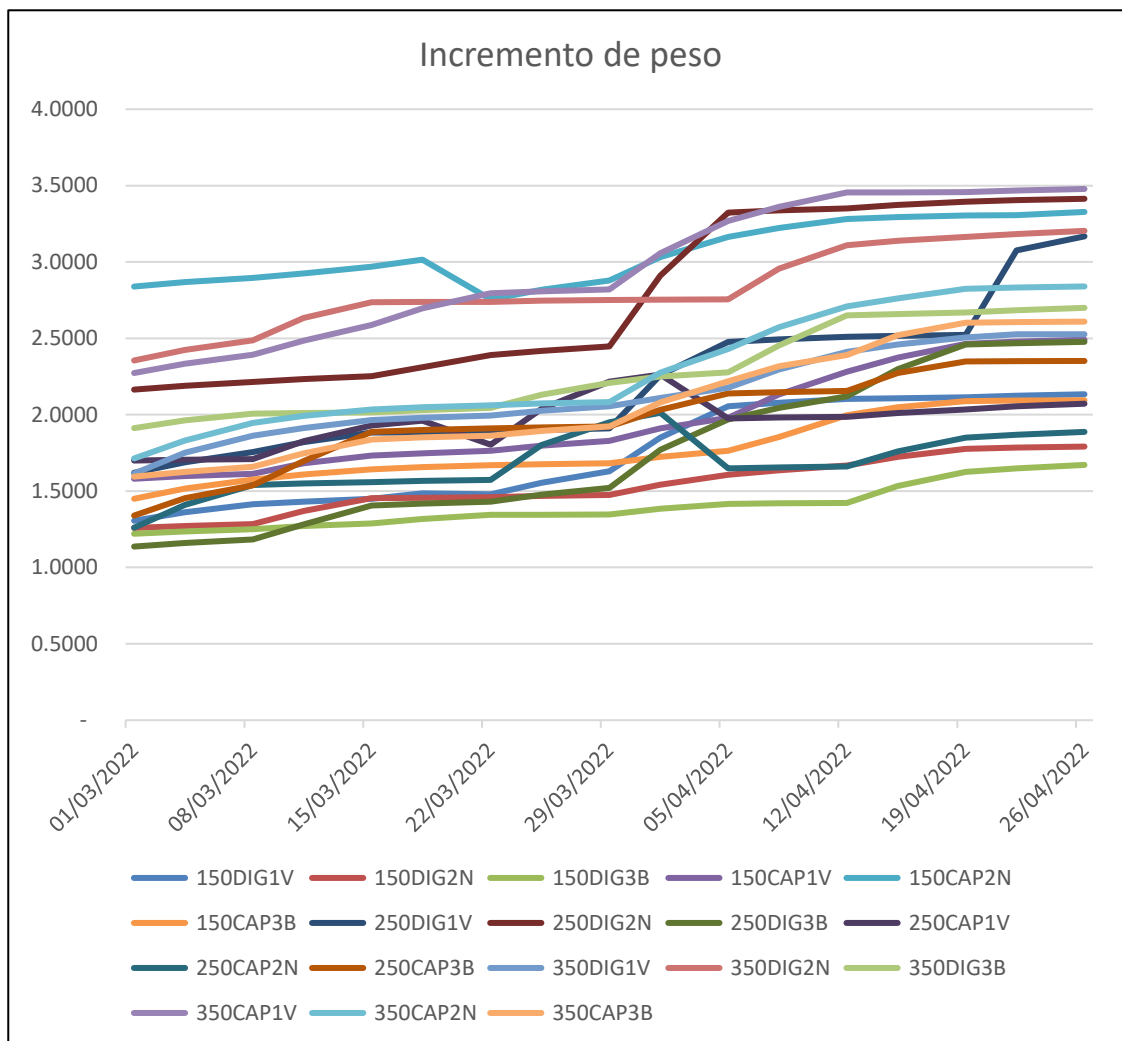


Figura. 11 Grafica del crecimiento experimentado por cada uno de los individuos objeto de estudio (líneas de color). En el eje horizontal está representado el tiempo (días) y en el eje vertical el peso medido en gramos. Fuente: elaboración propia.

Una vez analizado el aumento de peso con el tiempo mediante la interpretación de la Figura. 11, se puede afirmar que los parámetros utilizados en el experimento son adecuados para el crecimiento en las especies *M. digitata* y *M. capitata*. Esto se debe a que los parámetros que se han fijado para dicho ensayo se han recopilado de la consulta de diferentes artículos de temática similar, por lo que, a pesar de su validez, no son los únicos que pueden contemplarse, ya que hay estudios donde los rangos de, por ejemplo, temperatura, salinidad y concentración de calcio son más ajustados y los han establecido en temperaturas de 25,5-26,5°C, salinidades de 33,9-34,3 ppm o la concentración de calcio entre 400-420 mg/L (Ernst et al., 2011). También hay artículos donde el rango de, por ejemplo, temperaturas es mucho menos restrictivo y contemplan, un rango de temperaturas más amplio de 23-29°C (Drazenovic & Fagan, 2015).

Comparaciones PAR-especie

Planteamiento

Se pretende analizar si la variable especie considerando dos valores (*Montipora digitata*, *Montipora capitata*) y la variable *Photosynthetically Active Radiation* a tres niveles ($150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), influyen en la variable diferencia de peso. Para realizar dicho análisis se usará una prueba ANOVA de dos factores. Con esta finalidad se obtuvo el peso de los individuos al comienzo del experimento y al final de éste durante un periodo de 57 días. Lo datos utilizados en este análisis se muestran en la Tabla. 2.

Tabla. 2 Valores de diferencia de peso final-inicial (columna 4) de cada individuo analizado en el experimento (columna 1), de los cuales también se indica la especie (columna 2) y el PAR al que se ha sometido (Columna 3).

Individuo	Especie	PAR	Diferencia de peso (F-I)
150DIG1V	<i>M. digitata</i>	PAR150	0.8278
150DIG2N	<i>M. digitata</i>	PAR150	0.5325
150DIG3B	<i>M. digitata</i>	PAR150	0.4506
150CAP1V	<i>M. capitata</i>	PAR150	0.9099
150CAP2N	<i>M. capitata</i>	PAR150	0.4890
150CAP3B	<i>M. capitata</i>	PAR150	0.6449
250DIG1V	<i>M. digitata</i>	PAR250	1.5479
250DIG2N	<i>M. digitata</i>	PAR250	1.2493
250DIG3B	<i>M. digitata</i>	PAR250	1.3402
250CAP1V	<i>M. capitata</i>	PAR250	0.3718
250CAP2N	<i>M. capitata</i>	PAR250	0.6276
250CAP3B	<i>M. capitata</i>	PAR250	1.0121
350DIG1V	<i>M. digitata</i>	PAR350	0.9114
350DIG2N	<i>M. digitata</i>	PAR350	0.8487
350DIG3B	<i>M. digitata</i>	PAR350	0.7875
350CAP1V	<i>M. capitata</i>	PAR350	1.2049
350CAP2N	<i>M. capitata</i>	PAR350	1.1263
350CAP3B	<i>M. capitata</i>	PAR350	1.0147

Condiciones

Para poder aplicar la ANOVA bifactorial se han de cumplir las siguientes condiciones:

Normalidad

Se ha de cumplir que las muestras que se hayan obtenido de poblaciones estadísticas sean normales. Para llevar a cabo dicho análisis y puesto que los tamaños

muestrales son pequeños (Tabla. 2), se usó la prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors, para comprobar dicha condición.

Para las muestras obtenidas según la especie, los p-valores obtenidos 0.3598 (especie *M. digitata*) y 0.5162 (especie *M. capitata*), son suficientemente grandes como para no rechazar la condición de normalidad.

En su caso, para las obtenidas según el nivel de PAR al que han estado sometidas cada una de las piezas ($150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) los p-valores obtenidos 0.4835, 0.7014 y 0.8565, respectivamente, resultan igualmente muy grandes, por lo que tampoco en este caso podemos rechazar la condición de normalidad.

Homocedasticidad

Así pues, en esta ocasión la prueba de Levene (adecuada para evaluar la igualdad de las varianzas para una variable calculada para dos o más grupos) para analizar la homogeneidad de las varianzas, muestra un p-valor= 0.2342, también muy grande por lo que podemos asumir que se cumple la condición de varianzas homogéneas.

ANOVA bifactorial

En este caso, se puede, por tanto, aplicar la prueba ANOVA de dos factores. Esta prueba nos permite analizar qué relación hay entre una variable dependiente cuantitativa (diferencia de peso final menos la inicial) y dos variables independientes cualitativas (factores: PAR y especie) cada uno con varios niveles, y el resultado obtenido se presenta en la Tabla. 3.

Tabla. 3 Resultados obtenidos de R-commander tras la prueba ANOVA bifactorial. La primera columna hace referencia a la comparación que se ha realizado, la quinta hace referencia al p-valor y la sexta al código de significancia.

Response: Diferencia.de.peso..F.I.					
	Sum Sq	Df	F value	Pr (>F)	
Especie	0.06658	1	1.776	0.207397	
PAR	0.52696	2	7.0286	0.00954	**
Especie:PAR	0.80192	2	10.696	0.002154	**
Residuals	0.44984	12			

 Signif. Codes: 0 '***'0.001 '**'0.01 '*'0.05 '.'0.1 ' '1

De ésta se puede deducir:

- Con un p-valor grande como el obtenido de 0.207397, no se puede rechazar la hipótesis nula de igualdad de medias según la especie, es decir ambas especies aumentan de peso por igual en promedio (Tabla. 3).
- El p-valor para la variable PAR es pequeño: 0.009540 (menor que $\alpha=0.05$). Por tanto, el crecimiento de los corales dependiendo de la cantidad de PAR a la que se someten es significativo: esta afirmación se fundamenta con ** de seguridad (Tabla. 3). A razón de esto, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias según el PAR, por lo que se debe usar los contrastes *post-hoc*, para poder decidir qué pares de comparaciones son o no significativos.

Para este caso se utilizó el método de DHS de Tukey, que proporciona los intervalos de confianza y el p-valor ajustado para cada par de comparaciones. Esto permite decidir si las diferencias por pares son o no significativas (Tabla. 4).

Tabla. 4 Resultado de los contrastes *post-hoc* hechos mediante el método DHS de Tukey. Los resultados proporcionan los intervalos de confianza (columna 3 y 4) y el p-valor ajustado (columna 5) para los contrastes de los diferentes PAR (columna 1).

	diff	lwr	upr	p adj
250-150	0.38236667	0.08414185	0.6805915	0.0130286
350-150	0.33980000	0.04157518	0.6380248	0.0258160
350-250	-0.04256667	-0.34079148	0.2556582	0.9236805

Al realizar estos contrastes, se puede observar que para los PAR $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ las diferencias son significativas: es decir bajo el PAR $250\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, los individuos crecen más que bajo el PAR $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. En cambio, al comparar el PAR $250\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ con el $350\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, la diferencia no es significativa, es decir los individuos aumentan de peso en promedio lo mismo bajo ambos valores de PAR.

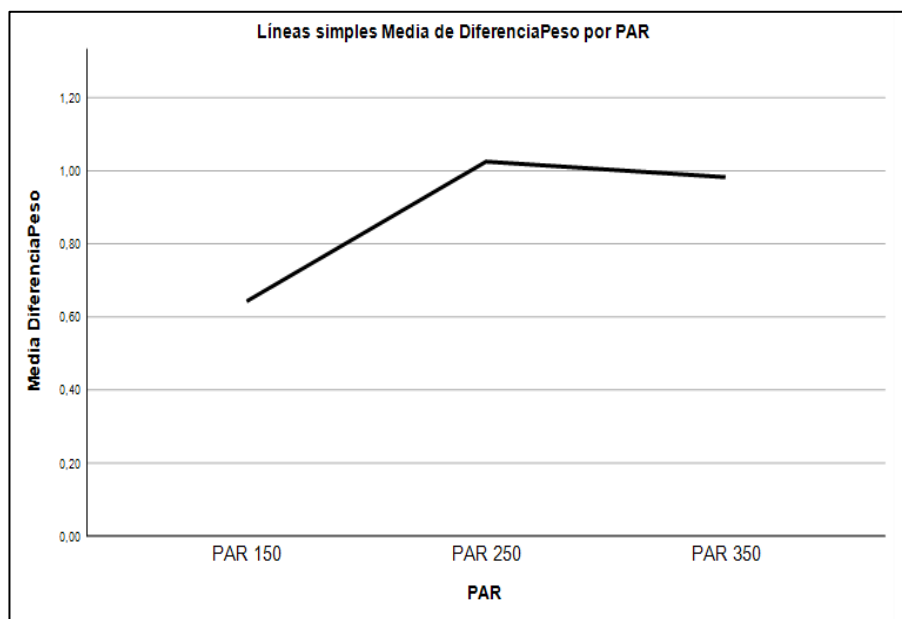


Figura. 12 Gráfico de la diferencia de peso media (eje Y) para cada nivel de PAR (eje x). Fuente: Elaboración propia.

La Figura. 12, que representa el gráfico de medias permite visualizar cómodamente los resultados obtenidos, donde, aunque el peso desde el PAR 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ disminuye, la diferencia observada no es significativa estadísticamente.

En resumen, al pasar del PAR 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, los individuos crecen más en promedio, pero no lo hacen al pasar del PAR 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

- c) Finalmente, la Tabla. 3 del ANOVA nos muestra con un p-valor 0.002154 que existe interacción entre el factor especie y el factor PAR. Dicho de otra forma, no aumentan de peso de igual forma las especies según el PAR al que estén sometidos. Además, la decisión se toma de forma concluyente con bastante seguridad (**, Tabla. 3).

En la Figura. 13, el gráfico de medias según ambos factores, indica que la especie *Montipora digitata* crece más al estar expuesta a un PAR de 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ a diferencia de la especie *Montipora capitata*, la cual su crecimiento mejora cuando se mantiene en un PAR de 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

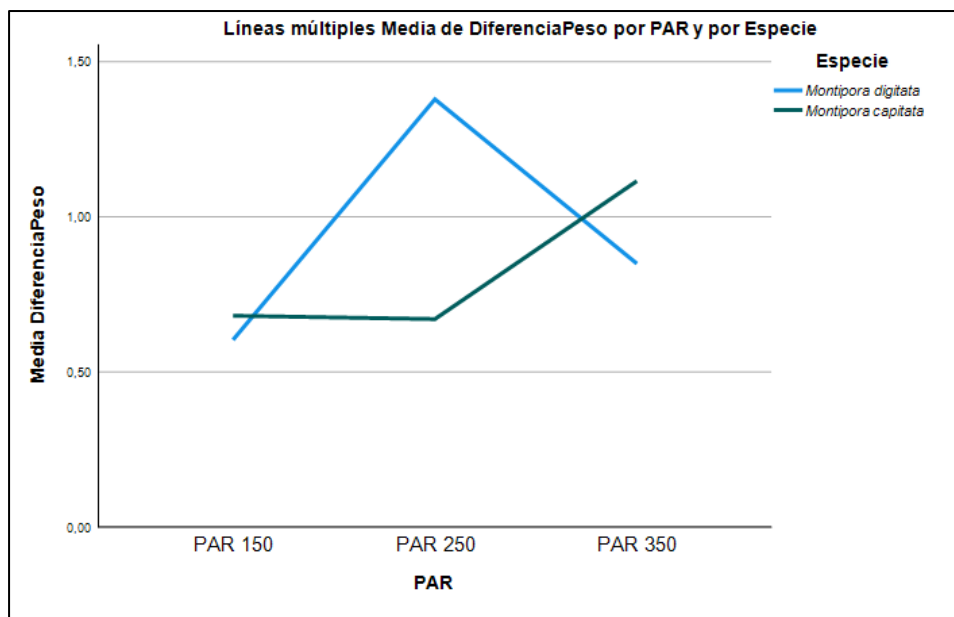


Figura. 13 Gráfico de la diferencia de peso media (eje Y) de cada especie (líneas de color) para cada nivel de PAR (eje x). Fuente: Elaboración propia.

De los resultados obtenidos con la prueba de ANOVA bifactorial, es importante destacar que para lo comentado en el apartado a), se podría plantear la hipótesis de que quizás el crecimiento de las especies del género *Montipora* se produce de la misma manera independientemente de la cantidad de PAR a la que están sometidas, sin embargo, sería necesario completar el experimento considerando un mayor número de especies de este género. Esta hipótesis podría apoyarse en el supuesto señalado por varios autores donde al analizar distintas especies de *Montipora* y algún aspecto de su crecimiento, no hacen distinción sobre éstas, sino que las asumen como *Montipora spp.* (Das et al., 2022; Lange & Perry, 2020; van Woesik & Done, 1997). A raíz de esto, podría ser interesante realizar una investigación más amplia sobre el tema con el objetivo de analizar si dichas asunciones están ligadas a estos resultados obtenidos en el ensayo.

En segundo lugar, haciendo referencia al apartado b), se puede ver que el crecimiento del género *Montipora* objeto de este estudio, se produce de diferentes maneras según al PAR al que estén expuestos independientemente de la especie, donde según los resultados, el rango óptimo de crecimiento para el género *Montipora* sería de 250-350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (valores dentro de los rangos señalados en la metodología). Sin embargo, para poder afirmar contundentemente dicha hipótesis debería completarse el estudio con más especies del género *Montipora* y más zonas de diferente PAR con tal de ver el rango óptimo exacto para el género. Estos resultados son contrastables con los de otros autores que estudian la influencia de la luz, y por tanto del PAR sobre la densidad y producción de las zooxantelas que poseen los corales

del género *Montipora* (Haukur Magnusson et al., 2007; Kinzie, 1993; Papina et al., 2003), las cuales influyen sobre el crecimiento de estos organismos (Kinzie et al., 1984; Papina et al., 2003).

Por último, tras realizar las comparaciones con la interacción de los dos factores (especie y PAR) expuestas en el apartado c), se han visto diferencias significativas en dicha interacción. Relacionando los dos factores se han podido establecer los posibles valores de PAR donde el crecimiento de cada una de las especies es más óptimo (*M. digitata*: $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; *M. capitata*: $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Estos valores óptimos son coherentes ya que se encuentran dentro de los rangos o valores establecidos por otros autores, como Rocha et al. (2013), donde establecen el PAR para su ensayo en $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, o criadores profesionales de corales como Thein (2019) o Riddle (2008), los cuales establecen los rangos de PAR para su cultivo en cautividad entre $200\text{-}300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y $140\text{-}550 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente.

La coherencia de estos resultados anima a pensar que probablemente si se repite el estudio el resultado sería el mismo, recomendándose aumentar la cantidad de zonas con diferentes PAR, al objeto de ver como fluctúa el crecimiento de las especies según se aumenta o se reduce el valor de este parámetro alrededor de la zona óptima que se ha establecido en este experimento.

Tasas de crecimiento

A partir de los datos del peso de los corales recogidos durante todo el experimento (Anexo IV), se ha realizado un tratamiento de los datos para obtener las tasas de crecimiento de cada especie en cada zona de PAR. Para llevar a cabo dicho tratamiento, se realizaron diferentes cálculos:

1. Se calculó la diferencia de peso que había entre una toma de datos y otra, obteniendo un total de 16 diferencias de peso por cada pieza involucrada en el estudio (18 piezas).
2. A continuación, se calcularon las tasas de crecimiento diario para cada intervalo de muestreo (Anexo VI), dividiendo cada una de las diferencias de peso calculadas anteriormente entre el tiempo en días transcurridos entre los pesajes (martes a viernes: 3 días, viernes a martes: 4 días).
3. Una vez obtenidas las tasas de crecimiento diario para cada individuo e intervalo de muestreo se promedió la tasa en este intervalo para cada una de las especies y PAR específico al que se han sometido.

4. Posteriormente promediando las medias calculadas, se obtuvieron las tasas medias de crecimiento para cada PAR y especie del transcurso total del experimento junto a su desviación típica (Tabla. 5).

Tabla. 5 Tasa de crecimiento y desviación típica para cada grupo de ejemplares establecidos según la especie y el nivel de PAR al cual están sometidos.

Grupo de ejemplares	Tasas de crecimiento media en el experimento (g/día)	Desviación típica (g/día)
150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ <i>M. digitata</i>	0.0111	± 0.0137
150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ <i>M. capitata</i>	0.0140	± 0.0126
250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ <i>M. digitata</i>	0.0257	± 0.0398
250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ <i>M. capitata</i>	0.0175	± 0.0206
350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ <i>M. digitata</i>	0.0156	± 0.0167
350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ <i>M. capitata</i>	0.0205	± 0.0187

Las tasas de crecimiento del transcurso del ensayo que se han calculado se ven representadas en la Tabla. 5, las cuales varían entre 0,0100-0,0260 g/día según la especie y el PAR al cual han estado sometidos los corales. Es interesante destacar su desviación estándar, donde se puede apreciar que, en algunos casos, la dispersión del conjunto de datos numéricos es algo elevada, sin embargo, esto probablemente se debe a que en momentos puntuales del experimento donde se haya podido desestabilizar algún parámetro, alguna de las réplicas haya podido ver reducida su velocidad de crecimiento (Anexo VI) y a que el tamaño muestral no es demasiado elevado.

En otros estudios donde se mide y se tiene en cuenta la tasa de crecimiento de corales tanto *in situ* como *ex situ*, generalmente contemplan otros parámetros distintos al peso como sistema con el que medir el crecimiento del coral y sus ensayos suelen tener duraciones mucho mayores al planteado en este trabajo. Algunos autores han estimado el crecimiento de los corales a partir del crecimiento en área de la base (cm^2) durante un total de 2 años y medio (Page et al., 2018), otros estudios calculan las tasas de crecimiento lineal en milímetros por año (P. A. Baker & Weber, 1975; Lange & Perry, 2020), otros calculan el crecimiento en periodos de tiempo inferiores, pero igualmente

por distancia lineal (Morell Christ, 2018), etc. El crecimiento de los corales medido sólo en distancia lineal no tiene porqué representar el crecimiento total del coral, por este motivo la metodología planteada en el presente estudio puede contribuir al análisis de este factor de una manera sencilla y eficaz para periodos de tiempo reducidos.

CONCLUSIONES

Tras el análisis sobre los resultados obtenidos y las observaciones expuestas se puede concluir que:

- Se ha podido comprobar que las condiciones de mantenimiento en el cultivo *ex situ* propuestas para el crecimiento de estas especies han sido las adecuadas, ya que se ha logrado producir crecimiento de los individuos durante el experimento.
 - Dentro de estos parámetros se incluyen: temperatura, salinidad, pH, nitratos, amoníaco, fosfatos, concentración de magnesio, concentración de calcio y Alcalinidad.
- El estudio del crecimiento de los corales en relación con los factores de crecimiento establecidos (PAR y especie), han revelado un nivel de PAR óptimo para cada una de las especies (*M. digitata*: $250 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; *M. capitata*: $350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$).
 - Además, se aporta información sobre el crecimiento del género *Montipora*, donde sin tener en cuenta la cantidad de PAR a la que se someten, las dos especies estudiadas crecen de la misma manera.
 - Por otro lado, teniendo en consideración únicamente la radiación fotosintéticamente activa, el género *Montipora* parece crecer más rápidamente en el rango de $250\text{-}350 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, estableciendo un precedente para un estudio más amplio sobre el tema pudiendo hacerse de manera general para todas las especies del género de forma conjunta.
- Con los datos obtenidos durante el experimento se calcularon las tasas de crecimiento de cada especie en cada PAR. Del análisis de estas tasas se puede concluir que, a causa de los desequilibrios puntuales de algunos parámetros y el tamaño muestral reducido, las desviaciones estándar son algo elevadas.
 - Sin embargo, es interesante analizar la metodología utilizada para llevar a cabo este objetivo, ya que el obtener el peso húmedo medido a partir de balanza de precisión, puede resultar una técnica sencilla, barata y eficaz, para el análisis de crecimiento de corales de pequeño tamaño en intervalos cortos de tiempo.

LIMITACIONES Y OBSERVACIONES DEL EXPERIMENTO

Tras el análisis de los resultados y de las conclusiones del presente trabajo, se abren nuevas posibilidades para profundizar en el conocimiento de la acuicultura *ex situ* y crecimiento de los corales duros. Además, hay que considerar las limitaciones que estudios como este pueden tener por lo novedoso o falta de experimentación en el campo.

En primer lugar, es conveniente prestar atención al proceso de ciclado o maduración de los tanques. En el presente estudio este proceso se llevó a cabo durante 6 semanas, pero durante el experimento se tuvo que hacer frente a diversas plagas de dinoflagelados y algas por lo que quizás el acuario no había alcanzado su estado óptimo, por lo que se recomienda ampliar el tiempo invertido en dicha tarea. Además, se podrían relacionar estos problemas a la falta de diversidad de colonias bacterianas, ya que, únicamente se utilizaron dos clases de productos de bacterias comerciales, por lo que sería recomendable agregar algún tipo de coctel bacteriano incrementando la diversidad bacteriana con el propósito de fortalecer el biofiltro del acuario, evitar este tipo de *blooms* no deseados y establecer un equilibrio de parámetros lo más estable posible.

Hay que prestar especial atención al proceso de unión de la pieza de coral a su base. El cianoacrilato, es una buena opción considerando que el peso de éste no supone un problema para el experimento ya que lo que se analiza es el crecimiento de los corales y no su peso neto. Dependiendo de la duración del experimento y la manipulación de las piezas, se ha detectado que alguna replica puede desprenderse de la base con este adhesivo, lo que puede suponer un problema ya que, al adherirlo de nuevo, la cantidad de cianoacrilato no tiene por qué ser la misma, por lo que posteriormente se deberían hacer correcciones sobre los datos tomados.

Con tal de evitar errores se plantean dos posibles mejoras. En primer lugar, cambiar de adhesivo a uno más eficaz que produzca una unión más duradera y fuerte entre el coral y su base, sin embargo, se corre el riesgo de que un adhesivo más potente pueda dañar al coral debido a su composición o utilizar un pegamento especializado que no sea dañino para el coral, pero encarezca el presupuesto de proyecto. Y, en segundo lugar, tomar cierto tiempo entre el microesquejado de las piezas y el comienzo de la manipulación, con tal de que las piezas de coral crezcan lo suficiente como para que la adhesión a su base se produzca con su propio tejido y no dependa del pegamento.

También sería recomendable en futuros estudios tener en cuenta el proceso de aclimatación de los corales a las condiciones del acuario en el que se introducen, ya que probablemente una mayor cantidad de tiempo de adecuación al tanque en el cual se va a desarrollar el experimento permita a los corales experimentar un crecimiento más rápido y ajustado a la realidad, proporcionando datos de mayor rigurosidad.

Por último, debido a la biología de este tipo de corales de crecimiento lento, se recomienda incrementar al máximo las réplicas de cada especie en cada PAR, así como el tiempo de duración del experimento con tal de obtener la mayor cantidad de datos y variaciones que se puedan dar en el desarrollo de éstos, lo que permitiría poder detectar posibles diferencias significativas en el crecimiento.

LÍNEAS FUTURAS

Reproducibilidad y producción

El presente experimento puede ser de interés para la aplicación de la metodología en diferentes industrias y sectores.

Como se ha comentado anteriormente, por sus características, los corales pueden tener una gran cantidad de usos y aplicaciones tanto para el medio natural como para el propio ser humano. Por este motivo, el diseño de este experimento es reproducible no solo para las especies tratadas en éste, sino que puede servir para otros tipos de corales zooxantelados dependiendo de las necesidades de los sectores involucrados en el estudio.

Esta optimización del PAR junto a las técnicas de microesquejado y la acuicultura *ex situ* puede conducir a una producción a gran escala de corales, ya que con la aplicación de estas técnicas se puede mejorar el crecimiento de los mismos. El análisis del PAR permite obtener una mejor utilización de la luz, distribuyendo los corales en las zonas más adecuadas e incrementando las tasas de crecimiento y producción, además de ahorrar costes energéticos. En el caso de la conservación de corales y para la restauración de poblaciones en el medio natural, se podrían obtener buenos resultados a partir de la cría de esquejes obtenidos mediante la reproducción por microesquejado, teniendo una gran variedad de éstos en todo momento para, según las necesidades de la zona a restaurar, instalar el número y tipo de corales necesarios.

En el caso de la farmacéutica, facilita la obtención de una mayor cantidad de corales para utilizar a la hora de crear los productos necesarios para la industria. Además de brindar más oportunidades de investigación orientada a la búsqueda de nuevas medicinas, remedios y tratamientos, ya no solo relacionados con la farmacéutica sino también en el ámbito médico. El uso adecuado de los parámetros de cultivo también podría servir para optimizar la obtención de determinados metabolitos de los corales en esta industria.

Dado el interés en la acuicultura de ornamentación, esta metodología puede suponer un mayor y mejor crecimiento de las piezas de coral reportando un aumento en la calidad y variedad de estas. Se podría conseguir una mejor producción de especies, tipos y coloraciones altamente demandadas reportando a este sector un mayor rendimiento, que provocaría un aumento de la oferta, consecuentemente la reducción de los precios y estimularía positivamente la demanda.

Por último, este tipo de metodología podría ser interesante enfocado a la investigación, ya que la acuicultura *ex situ* optimizada favorecería al desarrollo de ciertos ensayos con fines científicos pudiendo llegar a entender mejor la biología y fisiología de estos seres vivos.

Todo esto sin olvidar que en el pasado la única fuente de obtención de corales era el mar, por lo que todo estudio que fomente la reproducción y cría *ex situ*, favorece que el ecosistema no quede dañado por la acción antrópica para satisfacer la demanda de estas industrias.

Técnica de medida

La técnica de medida utilizada está basada en la propuesta por Jokiel *et al.* (1978), y tiene las mismas ventajas que ésta, sin embargo, en el presente estudio se ha cambiado el instrumento de medida.

Esta técnica renovada, permite el pesado total de piezas no muy voluminosas y pesadas con un error de 0.001 g, aportando precisión y sencillez al mismo tiempo que no es muy invasiva para las piezas de coral. Por este motivo es una técnica a tener en cuenta dentro de la diversidad de metodologías para la medición del crecimiento de los corales.

BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, M. J., Carlson, B., & Crow, G. L. (1995). Coral growth in high-nutrient, low-pH seawater: a case study of corals cultured at the Waikiki Aquarium, Honolulu, Hawaii. In *Coral Reefs* (Vol. 14).
- Baker, A., Starger, C. J., McClanahan, T. R., & Glynn, P. W. (2004). Corals' adaptive response to climate change. *Nature*, *430*(7001), 741–741.
- Baker, P. A., & Weber, J. N. (1975). CORAL GROWTH RATE: VARIATION WITH DEPTH. *Earth and Planetary Science Letters*, *27*, 57–61.
- Bik, H. M., Alexiev, A., Aulakh, S. K., Bharadwaj, L., Flanagan, J., Haggerty, J. M., Hird, S. M., Jospin, G., Lang, J. M., Sauder, L. A., Neufeld, J. D., Shaver, A., Sethi, A., Eisen, J. A., Coil, D. A., & Bik, C. H. (2019). Microbial Community Succession and Nutrient Cycling Responses following Perturbations of Experimental Saltwater Aquaria. <https://doi.org/10.1128/mSphere>
- Boström-Einarsson, L., Babcock, R. C., Bayraktarov, E., Ceccarelli, D., Cook, N., Ferse, S. C. A., Hancock, B., Harrison, P., Hein, M., Shaver, E., Smith, A., Suggett, D., Stewart-Sinclair, P. J., Vardi, T., & McLeod, I. M. (2020). Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLoS ONE*, *15*(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226631>
- Briggs, J. C., & Bowen, B. W. (2012). A realignment of marine biogeographic provinces with particular reference to fish distributions. *Journal of Biogeography*, *39*(1), 12–30. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02613.x>
- Browne, N. K. (2012). Spatial and temporal variations in coral growth on an inshore turbid reef subjected to multiple disturbances. *Marine Environmental Research*, *77*, 71–83. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2012.02.005>
- Brusca, nR., Moore, W., Shuster, S., & Haver, N. (2016). *Invertebrates* (3rd ed.). *McGraw Hill*.
- Buddemeier, R. W., Maragos, J. E., & Knutson, D. W. (1974). RADIOGRAPHIC STUDIES OF REEF CORAL EXOSKELETONS: RATES AND PATTERNS OF CORAL GROWTH. In *mar. Biol. Ecol* (Vol. 14).

- Das, R. R., Wada, H., Masucci, G. D., Singh, T., Tavakoli-Kolour, P., Wada, N., Tang, S. L., Yamashiro, H., & Reimer, J. D. (2022). Four-Year Field Survey of Black Band Disease and Skeletal Growth Anomalies in Encrusting *Montipora* spp. Corals around Sesoko Island, Okinawa. *Diversity*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/d14010032>
- Drazenovic, M., & Fagan, J. M. (2015). The Effects of Aquarium Size, Temperature, and Dissolved Ion Concentrations on Growth Rates of Stony Corals and Colonial Anemones. Analyzing Captive Coral Growth Using Aquarists On-line Aquarium Journal Submissions Introduction to Achieving Healthy Growth in Captive Corals in Home Aquaria.
- Dunn, J. G., Sammarco, P. W., & LaFleur, G. (2012). Effects of phosphate on growth and skeletal density in the scleractinian coral *Acropora muricata*: A controlled experimental approach. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 411, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2011.10.013>
- Ernst, S., Janse, M., Renema, W., Kouwenhoven, T., Goudeau, M.-L., & Reichart, G.-J. (2011). BENTHIC FORAMINIFERA IN A LARGE INDO-PACIFIC CORAL REEF AQUARIUM. *Journal of Foraminiferal Research*, 41(2), 101–113.
- FAO. (2022). *Acuicultura*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura (FAO). <https://www.fao.org/aquaculture/es/>
- Forsman, Z. H., Rinkevich, B., & Hunter, C. L. (2006). Investigating fragment size for culturing reef-building corals (*Porites lobata* and *P. compressa*) in *ex situ* nurseries. *Aquaculture*, 261(1), 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2006.06.040>
- Fox, J., & Bouchet-Valat, M. (2022). *Rcmdr: R Commander (R package version 2.7-2)*.
- Goffredo, S., & Dubinsky, Z. (2016). The Cnidaria, past, present and future: The world of medusa and her sisters. *Springer Nature*.
- Golden Software, L. (2020). Surfer 19.1.189 (19.1.189).
- Guzmán, H. M., Cortés, J., & Rica, C. (1993) Arrecifes coralinos del Pacífico Oriental Tropical: Revisión y perspectivas. In *Rev. Biol. Trop* (Vol. 41, Issue 3).

- Haukur Magnusson, S., Fine, M., & Kühl, M. (2007). Light microclimate of endolithic phototrophs in the scleractinian corals *Montipora monasteriata* and *Porites cylindrica*. *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES*, 332, 119–128.
- Heyward, A. J., & Collins, J. D. (1985). Growth and Sexual Reproduction in the Scleractinian Coral *Montipora digitata* (Dana, 1846). In *Mar. Freshw. Res* (Vol. 36, Issue 5).
- Hickman, C. P., Eisenhour, D. J., l'Anson, H., Keen, S. L., Larson, A., & Garrison, C. W. (2021). *Principios integrales de zoología (18th ed.)*. S.L. SERVET DISEÑO Y COMUNICACIÓN.
- Hoey, A. S., Brandl, S. J., & Bellwood, D. R. (2013). Diet and cross-shelf distribution of rabbitfishes (f. Siganidae) on the northern Great Barrier Reef: Implications for ecosystem function. *Coral Reefs*, 32(4), 973–984. <https://doi.org/10.1007/s00338-013-1043-z>
- IBM Corp. (2020). IBM SPSS Statistics for Windows (Version 27.0.).
- IUCN. (2021). The IUCN Red List of Threatened Species. *The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3*. <https://www.iucnredlist.org>.
- Jokiel, P. L., Maragos J. E., & Franzisket L. (1978). Coral Growth: buoyant weight technique. In *Coral reefs: research methods* (pp. 581–594). UNESCO.
- Khalesi, M. K. (2008). *Ex Situ* Cultivation of the Soft Coral *Sinularia flexibilis* for Biotechnological Exploitation.
- Kinzie III, R. A., & Sarmiento, T. (1986). Linear extension rate is independent of colony size in the coral *Pocillopora damicornis*. *Coral Reefs*, 4, 177–181.
- Kinzie, R. A. (1993). Effects of ambient levels of solar ultraviolet radiation on zooxanthellae and photosynthesis of the reef coral *Montipora verrucosa*. In *Marine Biology* (Vol. 116). Springer-Verlag.
- Kinzie, R. A., Jokiel, L., & York, R. (1984). Effects of light of altered spectral composition on coral zooxanthellae associations and on zooxanthellae in vitro *. In *Marine Biology* (Vol. 78).

- Lange, I. D., & Perry, C. T. (2020). A quick, easy and non-invasive method to quantify coral growth rates using photogrammetry and 3D model comparisons. *Methods in Ecology and Evolution*, 11(6), 714–726. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13388>
- Leal, M. C., Calado, R., Sheridan, C., Alimonti, A., & Osinga, R. (2013). Coral aquaculture to support drug discovery. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 31, Issue 10, pp. 555–561). <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.06.004>
- Leal, M. C., Ferrier-Pagès, C., Petersen, D., & Osinga, R. (2016). Coral aquaculture: Applying scientific knowledge to *ex situ* production. *Reviews in Aquaculture*, 8(2), 136–153. <https://doi.org/10.1111/raq.12087>
- McClanahan, T. R., Maina, J., Moothien-Pillay, R., & Baker, A. C. (2005). Effects of geography, taxa, water flow, and temperature variation on coral bleaching intensity in Mauritius. *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES*, 298, 131–142.
- Microsoft Corporation. (2021). Microsoft Excel for Windows. *Microsoft* 365. <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/p/excel/CFQ7TTC0HR4R>
- Morell Christ, N. (2018). Cultivo “*ex situ*” para la restauración de arrecifes de coral del género *Pocillopora* (*Bahía Culebra, Costa Rica*).
- Mottus, M., Sulev, M., Baret, F., Lopez-Lozano, R., & Reinart, A. (2013). Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modeling. In C. Richter, D. Lincot, & C. A. Gueymard (Eds.), *Solar Energy* (pp. 140–169). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5806-7>
- Page, C. A., Muller, E. M., & Vaughan, D. E. (2018). Microfragmenting for the successful restoration of slow growing massive corals. *Ecological Engineering*, 123, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.017>
- Papina, M., Meziane, T., & van Woesik, R. (2003). Symbiotic zooxanthellae provide the host-coral *Montipora digitata* with polyunsaturated fatty acids. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B*, 135, 533–537. [https://doi.org/10.1016/S1096-4959\(03\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S1096-4959(03)00118-0)
- Pearse, V. B., & Muscatine, L. (1971). Role of Symbiotic Algae (Zooxanthellae) in Coral Calcification. In *Source: Biological Bulletin* (Vol. 141, Issue 2).

- Pucheu, J. I., Ortiz, A., Daniel, J., Llerena, V., & Erazo, S. (2006). Ciclos Biogeoquímicos y la transformación de metabolitos en el Acuario. *Related papers*. <http://www.sadelplata.org/>
- Reyes, J., & Santodomingo, N. (2002). ESPECIES DE CORALES Y CARACOLES CITES. Corales. In *Manual de Identificación CITES de Invertebrados Marinos de Colombia* (pp. 23–38). Servigráficas.
- Riddle, D. (2008, June 15). *Montipora digitata*: A Stony Coral for All Hobbyists. *Reefs.Com*. <https://reefs.com/magazine/montipora-digitata-a-stony-coral-for-all-hobbyists/>
- Rocha, R. J. M., Pimentel, T., Serôdio, J., Rosa, R., & Calado, R. (2013). Comparative performance of light emitting plasma (LEP) and light emitting diode (LED) in ex situ aquaculture of scleractinian corals. *Aquaculture*, 402–403, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.03.028>
- Sánchez Ortiz, I. A. (n.d.). EVALUACIÓN POR ENSAYOS SEMI-ESTÁTICOS DE TOXICIDAD AGUDA DEL NH3 EN ALEVINOS DE TILAPIA.
- Sheridan, C., Kramarsky-Winter, E., Sweet, M., Kushmaro, A., & Leal, M. C. (2013). Diseases in coral aquaculture: Causes, implications and preventions. In *Aquaculture* (Vols. 396–399, pp. 124–135). <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.02.037>
- Small, A. M., & Adey, W. H. (2001). Reef corals, zooxanthellae and free-living algae: a microcosm study that demonstrates synergy between calcification and primary production. In *Ecological Engineering* (Vol. 16). www.elsevier.com/locate/ecoleng
- Stoddart, D. R. (1969). ECOLOGY AND MORPHOLOGY OF RECENT CORAL REEFS. *Biological Reviews*, 44, 433–498.
- Tanaka, Y., Ogawa, H., & Miyajima, T. (2010). Effects of nutrient enrichment on the release of dissolved organic carbon and nitrogen by the scleractinian coral *Montipora digitata*. *Coral Reefs*, 29(3), 675–682. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0639-9>
- Terashima, I., Fujita, T., Inoue, T., Chow, W. S., & Oguchi, R. (2009). Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the

enigmatic question of why leaves are green. *Plant and Cell Physiology*, 50(4), 684–697. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcp034>

Thein, T. (2019, August 22). *Montipora* Coral Care. *Coral Care Library, Tidal Gardens*. <https://www.tidalgardens.com/blog/montipora-coral-care/>

Torregiani, J. H., & Lesser, M. P. (2007). The effects of short-term exposures to ultraviolet radiation in the Hawaiian Coral *Montipora verrucosa*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 340(2), 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.09.004>

van Woessik, R., & Done, T. J. (1997). Coral communities and reef growth in the southern Great Barrier Reef. In *Coral Reefs* (Vol. 16).

Veron, J. E. N., Stafford-Smith, M. G., Turak, E., & DeVantier, L. M. (2022). *Corals of the world*. Versión 0.01. <http://www.coralsoftheworld.org/page/home/>

Veron, J. E. N., & Wallace, C. C. (1984). *AUSTRALIAN INSTITUTE OF MARINE SCIENCE MONOGRAPH SERIES. SCLERACTINIA OF EASTERN AUSTRALIA. Family Acroporidae. (Vol.6, Part V)*. Australian Institute of Marine Science.

Wallace, C. C., Done, B. J., & Muir, P. R. (2012). Revision and catalogue of worldwide staghorn corals *Acropora* and *Isopora* (Scleractinia: Acroporidae) in the Museum of Tropical Queensland. In J. N. A. Hooper (Ed.), *Memoirs of the Queensland Museum | Nature* (Vol. 57). ORDER OF THE BOAR. www.qm.qld.gov.au

WoRMS Editorial Board. (2022). World Register of Marine Species (R. A. Froese, Ed.). *LifeWatch Belgium*. <https://doi.org/10.14284/170>

ANEXO I

Tabla I.1 Ficha de control de sistemas elaborada para el experimento.

DIA DE LA SEMANA	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES	
FECHA						
FRANJA HORARIA	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE
ACUARISTA						
SUCCIÓN POR REBOSE						
FILTRO MECANICO DE RODILLO						
SKIMMER						
CALENTADORES						
BOMBA DE SUBIDA						
SALIDA DE AGUA						
LUCES						
RED ANTISALTOS						
BOMBAS DE CIRCULACIÓN						
LIMPIEZA DE CRISTAL DEL ACUARIO						
RESINAS						
AUTORELLENADO (%)						
CAMBIO DE AGUA						
LLENADO DEL CUBO NEGRO DE OSMOSIS						

JUEVES		VIERNES		SÁBADO		DOMINGO	
MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE

ANEXO II

Tabla II.1 Ficha de control de los elementos vivos del sistema y su alimentación.

DIA DE LA SEMANA	LUNES		MARTES		MIÉRCOLES	
FECHA						
FRANJA HORARIA	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE
ACUARISTA						
CORALES PAR 150						
CORALES PAR 250						
CORALES PAR 350						
LIMPIEZA DE CORALES						
MELANURUS						
BIPARTITUS						
PAYASO PEQUEÑO						
PAYASO GRANDE						
LIMPIADOR						
GAMBA						
CARA DE CONEJO						
MANDARÍN						
MOLUSCOS Y EQUINODERMOS						
ALIMENTACIÓN						

JUEVES		VIERNES		SÁBADO		DOMINGO	
MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE	MAÑANA	TARDE

ANEXO III

Tabla III.1 Ficha de control de parámetros elaborada para el experimento. En cada celda se apunta el valor del parámetro para cada día correspondiente.

DIA DE LA SEMANA	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES
FECHA			
ACUARISTA			
Temperatura			
Salinidad			
Kh			
Mg			
Ca			
Nitratos			
Fosfatos			
Ph			

JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO

ANEXO IV

Tabla IV.1 Recopilación de los datos en bruto (peso de las piezas de coral en gramos) recolectados durante el transcurso del experimento.

Fecha	01/03/2022	04/03/2022	08/03/2022	11/03/2022	15/03/2022
Tiempo (días)	1	4	8	11	15
ID\peso	P0	P1	P2	P3	P4
150DIG1V	1.3059	1.3613	1.4128	1.4305	1.4485
150DIG2N	1.2587	1.2723	1.2845	1.3689	1.4527
150DIG3B	1.2207	1.2359	1.2513	1.2715	1.2889
150CAP1V	1.5808	1.5982	1.6137	1.6831	1.7314
150CAP2N	2.8385	2.8683	2.8961	2.9250	2.9688
150CAP3B	1.4496	1.5168	1.5761	1.6096	1.6419
250DIG1V	1.6197	1.6891	1.7548	1.8194	1.8835
250DIG2N	2.1644	2.1903	2.2138	2.2330	2.2512
250DIG3B	1.1367	1.1605	1.1838	1.2818	1.4056
250CAP1V	1.7000	1.7052	1.7094	1.8266	1.9295
250CAP2N	1.2604	1.4097	1.5388	1.5498	1.5577
250CAP3B	1.3398	1.4538	1.5369	1.6976	1.8874
350DIG1V	1.6144	1.7523	1.8626	1.9134	1.9641
350DIG2N	2.3551	2.4238	2.4873	2.6328	2.7371
350DIG3B	1.9122	1.9629	2.0072	2.0117	2.0163
350CAP1V	2.2730	2.3337	2.3916	2.4849	2.5878
350CAP2N	1.7135	1.8313	1.9453	1.9920	2.0338
350CAP3B	1.5947	1.6259	1.6597	1.7465	1.8369

18/03/2022	22/03/2022	25/03/2022	29/03/2022	01/04/2022	05/04/2022
18	22	25	29	32	36
P5	P6	P7	P8	P9	P10
1.4851	1.4797	1.5548	1.6298	1.8500	2.0561
1.4568	1.4608	1.4683	1.4755	1.5411	1.6058
1.3180	1.3439	1.3449	1.3458	1.3842	1.4154
1.7481	1.7643	1.7980	1.8293	1.9116	1.9797
3.0141	2.7553	2.8171	2.8784	3.0320	3.1648
1.6567	1.6693	1.6758	1.6821	1.7231	1.7643
1.8833	1.8836	1.8997	1.9109	2.2582	2.4763
2.3112	2.3914	2.4181	2.4463	2.9108	3.3234
1.4170	1.4298	1.4761	1.5207	1.7705	1.9692
1.9603	1.8030	2.0390	2.2170	2.2629	1.9749
1.5659	1.5738	1.8026	1.9504	2.0125	1.6481
1.8993	1.9111	1.9178	1.9224	2.0325	2.1389
1.9799	1.9945	2.0252	2.0558	2.1103	2.1761
2.7379	2.7381	2.7467	2.7515	2.7536	2.7551
2.0298	2.0453	2.1311	2.2087	2.2495	2.2769
2.6968	2.7947	2.8082	2.8196	3.0567	3.2685
2.0496	2.0621	2.0736	2.0822	2.2752	2.4309
1.8512	1.8632	1.8936	1.9227	2.0793	2.2194

08/04/2022	12/04/2022	15/04/2022	19/04/2022	22/04/2022	26/04/2022
39	43	46	50	53	57
P11	P12	P13	P14	P15	P16
2.0786	2.1025	2.1085	2.1137	2.1249	2.1337
1.6366	1.6678	1.7239	1.7768	1.7842	1.7912
1.4191	1.4231	1.5332	1.6245	1.6486	1.6713
2.1323	2.2805	2.3742	2.4639	2.4780	2.4907
3.2232	3.2820	3.2931	3.3041	3.3055	3.3275
1.8537	1.9965	2.0483	2.0891	2.0919	2.0945
2.4926	2.5104	2.5165	2.5226	3.0757	3.1676
3.3380	3.3514	3.3735	3.3936	3.4041	3.4137
2.0446	2.1198	2.2979	2.4587	2.4691	2.4769
1.9821	1.9870	2.0112	2.0352	2.0553	2.0718
1.6552	1.6619	1.7588	1.8507	1.8687	1.8880
2.1478	2.1554	2.2741	2.3490	2.3510	2.3519
2.2965	2.4110	2.4591	2.5056	2.5268	2.5258
2.9565	3.1102	3.1378	3.1642	3.1818	3.2038
2.4529	2.6494	2.6593	2.6683	2.6846	2.6997
3.3602	3.4553	3.4559	3.4582	3.4685	3.4779
2.5725	2.7081	2.7620	2.8247	2.8326	2.8398
2.3180	2.3913	2.5196	2.6017	2.6056	2.6094

ANEXO V

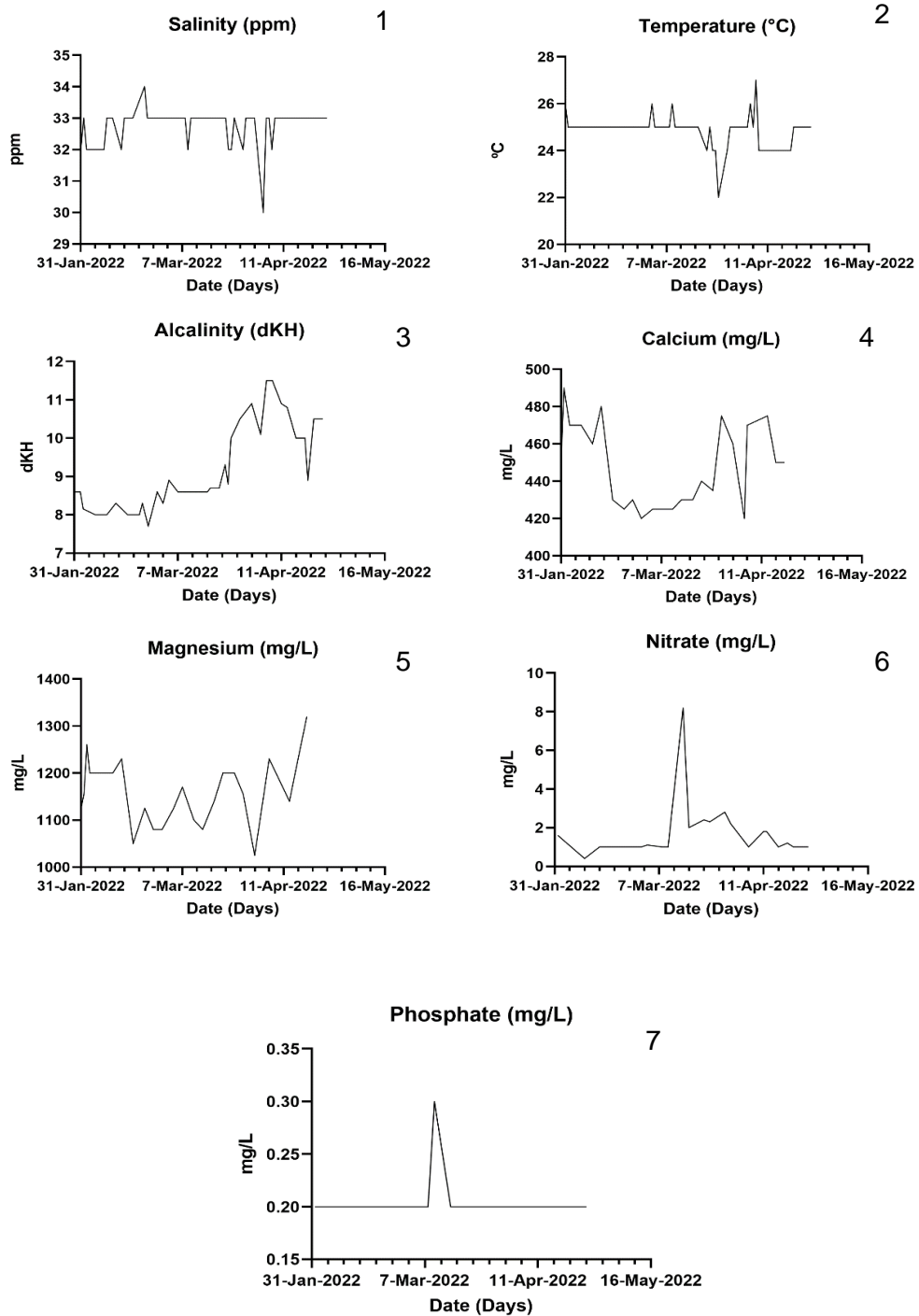


Figura V. 1 Recopilación de los gráficos de los valores de los parámetros frente al tiempo (días). Los parámetros representados son: Salinidad (1), Temperatura (2), Alcalinidad (3), Concentración de Ca (4), Concentración de Mg (5), Concentración de Nitratos (6) y Concentración de Fosfatos (7). Fuente: Elaboración Propia.

ANEXO VI

Tabla VI.1 Recopilación de las tasas de crecimiento de cada individuo para cada intervalo de muestreo para este experimento.

Tendencia	150DIG1V	150DIG2N	150DIG3B	150CAP1V	150CAP2N	150CAP3B
TEN1	0.0185	0.0045	0.0051	0.0058	0.0099	0.0224
TEN2	0.0129	0.0031	0.0038	0.0039	0.0070	0.0148
TEN3	0.0059	0.0281	0.0067	0.0231	0.0096	0.0112
TEN4	0.0045	0.0209	0.0044	0.0121	0.0109	0.0081
TEN5	0.0122	0.0014	0.0097	0.0056	0.0151	0.0049
TEN6	0.0000	0.0010	0.0065	0.0040	0.0000	0.0032
TEN7	0.0250	0.0025	0.0003	0.0112	0.0206	0.0022
TEN8	0.0187	0.0018	0.0002	0.0078	0.0153	0.0016
TEN9	0.0734	0.0219	0.0128	0.0274	0.0512	0.0137
TEN10	0.0515	0.0162	0.0078	0.0170	0.0332	0.0103
TEN11	0.0075	0.0103	0.0012	0.0509	0.0195	0.0298
TEN12	0.0060	0.0078	0.0010	0.0370	0.0147	0.0357
TEN13	0.0020	0.0187	0.0367	0.0312	0.0037	0.0173
TEN14	0.0013	0.0132	0.0228	0.0224	0.0027	0.0102
TEN15	0.0037	0.0025	0.0080	0.0047	0.0005	0.0009
TEN16	0.0022	0.0018	0.0057	0.0032	0.0055	0.0007

250DIG1V	250DIG2N	250DIG3B	250CAP1V	250CAP2N	250CAP3B
0.0231	0.0086	0.0079	0.0017	0.0498	0.0380
0.0164	0.0059	0.0058	0.0011	0.0323	0.0208
0.0215	0.0064	0.0327	0.0391	0.0037	0.0536
0.0160	0.0046	0.0310	0.0257	0.0020	0.0475
0.0000	0.0200	0.0038	0.0103	0.0027	0.0040
0.0001	0.0200	0.0032	0.0000	0.0020	0.0029
0.0054	0.0089	0.0154	0.0787	0.0763	0.0022
0.0028	0.0071	0.0112	0.0445	0.0370	0.0011
0.1158	0.1548	0.0833	0.0153	0.0207	0.0367
0.0545	0.1032	0.0497	0.0000	0.0000	0.0266
0.0054	0.0049	0.0251	0.0024	0.0024	0.0030
0.0044	0.0034	0.0188	0.0012	0.0017	0.0019
0.0020	0.0074	0.0594	0.0081	0.0323	0.0396
0.0015	0.0050	0.0402	0.0060	0.0230	0.0187
0.1844	0.0035	0.0035	0.0067	0.0060	0.0007
0.0230	0.0024	0.0019	0.0041	0.0048	0.0002

350DIG1V	350DIG2N	350DIG3B	350CAP1V	350CAP2N	350CAP3B
0.0460	0.0229	0.0169	0.0202	0.0393	0.0104
0.0276	0.0159	0.0111	0.0145	0.0285	0.0084
0.0169	0.0485	0.0015	0.0311	0.0156	0.0289
0.0127	0.0261	0.0011	0.0257	0.0105	0.0226
0.0053	0.0003	0.0045	0.0363	0.0053	0.0048
0.0036	0.0001	0.0039	0.0245	0.0031	0.0030
0.0102	0.0029	0.0286	0.0045	0.0038	0.0101
0.0076	0.0012	0.0194	0.0029	0.0021	0.0073
0.0182	0.0007	0.0136	0.0790	0.0643	0.0522
0.0164	0.0004	0.0069	0.0530	0.0389	0.0350
0.0401	0.0671	0.0587	0.0306	0.0472	0.0329
0.0286	0.0384	0.0491	0.0238	0.0339	0.0183
0.0160	0.0092	0.0033	0.0002	0.0180	0.0428
0.0116	0.0066	0.0023	0.0006	0.0157	0.0205
0.0071	0.0059	0.0054	0.0034	0.0026	0.0013
0.0000	0.0055	0.0038	0.0023	0.0018	0.0010