

EFFECTO DE SALINIDAD EN LA VARIABILIDAD DE AMINOÁCIDOS SIMILARES A MICOSPORINAS (MAAs) Y SU PAPEL EN LA ZONACIÓN VERTICAL DE *BOSTRYCHIA CALLIPTERA* EN RAÍCES DE MANGLAR

Gabriela Tenorio Charria

Departamento de Biología, Universidad del Valle, Calle 13 No. 100-00, Cali, Colombia.

correo electrónico: gabriela.tenorio@correounivalle.edu.com

Enrique Javier Peña Salamanca

Departamento de Biología, Universidad del Valle, Calle 13 No. 100-00, Cali, Colombia.

correo electrónico: enrique.pena@correounivalle.edu.com

Gerson-Dirceu López

Departamento de Química, Universidad del Valle, Calle 13 No. 100-00, Cali, Colombia.

correo electrónico: gerson.dirceu@correounivalle.edu.co

RESUMEN

El calentamiento global y el aumento de la salinidad en los estuarios tropicales representan un severo estrés hiperosmótico que inhibe los procesos fisiológicos de los organismos fototróficos. En este estudio se evaluó el efecto de la salinidad en la variabilidad de Aminoácidos Similares a Micosporinas (MAAs, por sus siglas en inglés) y su papel en la zonación vertical de *Bostrychia calliptera*, una macroalga presente en la zona intermareal superior de las raíces del manglar. Los MAAs son importantes metabolitos de fotoprotección; sin embargo, son pocos los estudios que los relacionan como osmoprotectores. El estudio se llevó a cabo con muestras colectadas en el manglar "Quita Calzon" en Buenaventura, Colombia. Se recolectaron muestras de *B. calliptera* de zonas altas y bajas de las raíces para un análisis ecológico y se realizaron experimentos exponiendo material vivo del alga a cuatro tratamientos de salinidad (5, 15, 35 y 55 ppm). Los resultados mostraron que *B. calliptera* es la especie dominante en ambas alturas de la raíz, evidenciando alta tolerancia ambiental. Los metabolitos especializados de la macroalga fueron analizados mediante Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (HPLC, por sus siglas en inglés) permitiendo la identificación tentativa de tres MAAs y otros tres compuestos pertenecientes a esta familia de aminoácidos. Los tres MAAs identificados corresponden a: *Mycosporine-glycine*, *Palythine* y *Palythine-serine*. Además, se encontró que el número y la variabilidad de los MAAs aumenta con el incremento del gradiente de salinidad, sugiriendo que las micosporinas actúan como osmolitos suplementarios, al contribuir a la tolerancia fisiológica que permite a *B. calliptera* dominar las zonas intermareales

superiores, caracterizadas por estrés múltiple. Estos resultados aportan evidencia sobre las estrategias adaptativas metabólicas de las macroalgas en manglares tropicales, ecosistema altamente vulnerable y variable.

Palabras clave: Bostrychia calliptera, Estrés salino, HPLC, Mycosporine-like Amino Acids, manglar, Osmorregulación, Pacífico colombiano, Zonación vertical.

ABSTRACT

Global warming and increased salinity in tropical estuaries represent severe hyperosmotic stress that inhibits the physiological processes of phototrophic organisms. In this study, the effect of salinity on the variability of mycosporine-like amino acids (MAAs) and their role in the vertical zonation of *Bostrychia calliptera*, a macroalga present in the upper intertidal zone of mangrove roots, was evaluated. MAAs are important photoprotective metabolites; however, few studies have related them to an osmoprotective role. The study was carried out using samples collected in the “Quita Calzón” mangrove in Buenaventura, Colombia. Samples of *B. calliptera* were collected from upper and lower root zones for ecological analysis, and experiments were conducted by exposing live algal material to four salinity treatments (5, 15, 35, and 55 ppt). The results showed that *B. calliptera* is the dominant species at both root heights, demonstrating high environmental tolerance. The specialized metabolites of the macroalga were analyzed using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC), allowing the tentative identification of three MAAs and three additional compounds belonging to this amino acid family. The three identified MAAs correspond to mycosporine-glycine, palythine, and palythine-serine. In addition, it was found that the number and variability of MAAs increase with increasing salinity gradients, suggesting that mycosporines act as supplementary osmolytes by contributing to the physiological tolerance that allows *B. calliptera* to dominate upper intertidal zones characterized by multiple stressors. These results provide evidence of the adaptive metabolic strategies of macroalgae in tropical mangroves, a highly vulnerable and variable ecosystem.

Keywords: Bostrychia calliptera, Salt stress, HPLC, Mycosporine-like Amino Acids, Mangrove, Osmoregulation, Colombian Pacific, Vertical zonation.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento oceánico y atmosférico, junto con el aumento de la solubilidad del CO₂ en el mar, generan cambios ambientales que impulsan la acidificación del océano y un aumento en la salinidad de los estuarios tropicales y subtropicales (Borburema *et al.*, 2022, 2024). Estos cambios simultáneos pueden representar factores de estrés relevantes dependiendo del rango de tolerancia y capacidad de aclimatación de los organismos fototróficos (Karsten, 2012; Sánchez De Pedro *et al.*, 2016; Diehl *et al.*, 2019; Gambichler, Zuccarello y Karsten, 2021; Orfanoudaki *et al.*, 2021; Borburema *et al.*, 2022, 2024).

Cuando el incremento de la salinidad supera los límites de tolerancia del organismo, se produce un estrés hiperosmótico, que reduce drásticamente el potencial hídrico celular, provocando deshidratación y efectos tóxicos de iones, lo que inhibe las vías fotosintéticas de las algas (Sánchez De Pedro *et al.*, 2016; Gambichler, Zuccarello y Karsten, 2021; Urrea-Victoria *et al.*, 2023). La comprensión de los mecanismos de aclimatación es fundamental para evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas marinos frente a los escenarios proyectados al cambio climático global (Karsten *et al.*, 1996; Karsten, 2012; Borburema *et al.*, 2022, 2024; Urrea-Victoria *et al.*, 2023).

Entre las estrategias bioquímicas de defensa de las algas se encuentran la síntesis y acumulación de metabolitos protectores, como los Carbohidratos de Bajo Peso Molecular (LMWC, por sus siglas en inglés) y las Micosporinas y Aminoácidos Similares a las Micosporinas (MAAs, por sus siglas en inglés) (Karsten *et al.*, 1996; Karsten, 2012; Gharib, Tabarzad y Hosseinabadi, 2020; Orfanoudaki *et al.*, 2021; Raj *et al.*, 2021; Borburema *et al.*, 2022, 2024). Los LMWC, como los polioles (p. ej., dulcitol y sorbitol) y los heterósidos, funcionan como osmolitos

orgánicos para conservar la homeostasis celular bajo estrés osmótico, además de actuar como compuestos de protección térmica y lumínica (Borburema *et al.*, 2022, 2024).

Por su parte, los MAAs son compuestos citoplasmáticos de bajo peso molecular, incoloros y solubles en agua. Conocidos primariamente por su función como protectores contra la radiación UV (Diehl *et al.*, 2019; Gambichler, Zuccarello y Karsten, 2021; Geraldés y Pinto, 2021). Debido a que tienen máximos de absorción que están entre 268 y 365 nm, dependiendo de su estructura molecular, concretamente del tipo de anillo y sustituyentes. Además de presentar altas absorptividades moleculares ($\epsilon = 12.400\text{--}58.800 \text{ M}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$), previniendo el daño fotoquímico (Geraldés y Pinto, 2021).

El rol de los MAAs también ha sido sugerido para abarcar la osmoprotección, la crioprotección, acidificación y tolerancia contra la desecación; especialmente en macroalgas intermareales expuestas a un ecosistema altamente variable. En condiciones de alta salinidad, ayudan en el mantenimiento de la integridad celular, aunque siempre propuesto como un papel secundario, ya que se desconoce de manera aislada cómo influye la salinidad en la actividad de los MAAs (Karsten, 2012; Diehl *et al.*, 2019; Orfanoudaki *et al.*, 2019; Orfanoudaki, Hartmann, Kamiya, *et al.*, 2020; Orfanoudaki *et al.*, 2021, 2021; Gambichler, Zuccarello y Karsten, 2021; Borburema *et al.*, 2022; Nikitashina y Pohnert, 2023; Urrea-Victoria *et al.*, 2023; Borburema *et al.*, 2024; Angulo-Núñez *et al.*, 2025).

El género *Bostrychia* (Rhodophyta), es un componente fundamental de los ecosistemas estuarinos a nivel mundial, predominando en manglares y marismas salinos. A nivel morfológico, dentro de la familia Rhodomelaceae, se diferencia principalmente por tener una disposición regular de las células de nivel, que corresponde a divisiones transversales de las células

pericentrales (Zuccarello y West, 2011; Peña-Salamanca, 2017). La especie *Bostrychia calliptera* se encuentra ubicada en estuarios, donde crece como epífita en las rizóforas y troncos de *Rhizophora mangle*. Esta alga forma céspedes en los manglares junto con otras macroalgas rojas, creando una asociación intermareal denominada *Bostrychietum* (Post, 1963). En zonas tropicales y subtropicales el complejo incluye principalmente especies de los géneros *Bostrychia*, *Catenella*, *Caloglossa* (Rhodophyta), *Boodleopsis* y *Rhizoclonium* (Chlorophyta) (Post, 1963; Peña-Salamanca, 2017). Esta asociación puede ser una estrategia ecológica para reducir el estrés lumínico en las raíces, ya que las algas crecen una encima de la otra con una aparente distribución vertical y acumulan partículas de sedimento estuarino en la superficie de sus ramas (Karsten *et al.*, 1996; Zuccarello y West, 2011).

La distribución de organismos en bandas o zonación vertical a lo largo de un gradiente ambiental, cumple un papel crucial en la estructura de las comunidades ecológicas. En el caso de las macroalgas, la zonación se observa a menudo en el intermareal, donde las especies se distribuyen a lo largo de un gradiente de exposición a distintos factores (Thomas, Turpin y Harrison, 1987; Carpenter, 1990; Davison y Pearson, 1996; Urrea-Victoria *et al.*, 2023). Factores que incluyen el tiempo de emersión (duración de la exposición al aire durante la marea baja), la irradiancia (cantidad de luz solar que reciben), la temperatura (particularmente durante la emersión) y la disponibilidad de nutrientes en cada nivel de la zona intermareal lo que impone distintos niveles de estrés osmótico, térmico y lumínico en las algas que habitan estos ambientes (Thomas, Turpin y Harrison, 1987; Carpenter, 1990; Davison y Pearson, 1996; Sánchez De Pedro *et al.*, 2016). En algas del género *Bostrychia*, se ha observado que su distribución vertical en los manglares depende de su capacidad de adaptación y supervivencia frente a cambios ambientales, que determinan las adaptaciones fisiológicas que desarrollan las algas para persistir en su nicho

ecológico (Peña-Salamanca, 2017; Rincón-Díaz *et al.*, 2021; Borburema *et al.*, 2022, 2024; Urrea-Victoria *et al.*, 2023).

El objetivo general de este estudio fue evaluar el efecto de la salinidad en la variabilidad de Micosporinas y Aminoácidos Similares a las Micosporinas (MAAs) y su papel en la zonación vertical de *B. calliptera* asociada a las raíces del manglar, *R. mangle*. Dentro de este contexto, los objetivos específicos fueron: i) Reconocer metabolitos en poblaciones de *B. calliptera* de las zonas alta (45-50 cm) y baja (0 cm a 1 m) de la raíz del manglar. ii) Evaluar la variabilidad de MAAs a cuatro tratamientos de salinidad (5, 15, 35 y 55 ppm) en *B. calliptera* iii) Determinar la composición y distribución vertical de algas en 2 zonas (alta y baja) en las raíces del manglar del Pacífico colombiano.

MÉTODOS

Área de estudio

El muestreo se realizó en la isla “Quita Calzon”, sobre la desembocadura del Río Dagua, ubicado en el municipio de Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia. Se encuentra cerca del barrio San Francisco, así como de Zabaletas, a una altitud aproximada de 13 metros sobre el nivel del mar, en las coordenadas geográficas 3°51'41" N y 77°3'59" W (Fig. 1). Este ecosistema forma parte de la región costera del Pacífico colombiano, caracterizado por su alta pluviosidad, temperaturas cálidas constantes y una marcada influencia de las mareas.

Se midieron las variables físico-químicas del punto de muestreo mediante la sonda multiparamétrica HANNA HI 9829 (tabla 1).

Recolección de Muestras

Se siguió un esquema de muestreo en parcelas distribuidas a lo largo de la línea mareal. A intervalos de 10 metros, se establecieron dos parcelas, y dentro de cada una se seleccionaron aleatoriamente dos raíces de manglar. En cada raíz, se realizó un raspado completo de la biomasa del complejo *Bostrychietum* en dos alturas distintas: zona alta y zona baja. Que fueron determinadas midiendo desde la línea de lodo (0 cm), hasta la línea de marea (1-1,50 m) y dividiéndolo en dos, determinando la zona inferior como baja y la zona superior como alta, con el fin de integrar la variabilidad vertical del hábitat. En total, se obtuvieron cuatro muestras por parcela (2 raíces $\times$ 2 alturas), lo que equivale a ocho muestras por intervalo de muestreo. El material colectado fue separado cuidadosamente, seleccionando la especie *B. calliptera*, que fue identificada morfológicamente y se preservó en frascos de vidrio con etanol absoluto (99,8%), almacenados en una nevera de icopor a oscuridad para su posterior análisis.

Para determinar la composición ecológica de especies en el manglar, se realizó la misma metodología descrita anteriormente, identificando morfológicamente los géneros reconocidos del complejo *Bostrychietum*.

Identificación morfológica

La identificación del material fisiológico se realizó con referencia a la descripción proporcionada por Marín-Salgado y Peña-Salamanca (2016), haciendo cortes transversales, revisando células pericentrales, midiendo longitud de las ramas, revisando fase reproductiva y esporas. Los ejemplares se observaron en el estereoscopio Nikon SMZ y microscopio LED Olympus CX-21 y fueron diferenciados en base a la siguiente descripción.

Rhizoclonium riparium (Roth) Harvey

Alga filamentosa uniseriada de coloración verde. Talo forma mechones de 7-15 cm de longitud. Filamentos simples, cilíndricos o con ligeras constricciones, de 20-55 µm de diámetro. Presenta pared celular gruesa, ligeramente curvada y cloroplastos reticulados. Crece como epífita del complejo *Bostrychietum*, enredada en otras algas, ubicada en las raíces de mangle rojo (*R. mangle*), desde el suelo hasta aproximadamente 1,20 m de altura (Fig 3. 1a, 1b).

Caloglossa leprieurii (Montagne) G.Martens

Alga laminar, de talo rastrero, de hasta 8 mm de longitud y 3 mm de diámetro, bifurcado y atenuado en los nudos y en otras partes, pero también alado en las ramificaciones. Ramificación monopódica que emerge sobre la parte dorsal. Rizoides en nudos ventrales, adheridos a raíces de *R. mangle*, asociado a las demás morfoespecies identificadas. Cada fronda con ancho de 1-13 mm y longitud de 1-30 mm, presenta ramificación dicotómica, pero en los nodos más desarrollados sobre el talo presentan ramificación radial (Fig 3. 2a)

***Catenella caespitosa* (Withering) L. M. Irvine**

Alga de coloración púrpura, firme al tacto y en campo puede encontrarse en agregaciones extensas sobre la raíz, erguida entre 4-7 mm sobre su último punto de sujeción, presenta segmentos bulbosos de formas oblongas, obovadas y ovadas. El grosor de cada segmento es de 110-6.000 μm , mientras que de longitud puede estar entre 400-18.000 μm . Con haptera en zona ventral sujeta al mangle u otras algas (Fig 3. 3a).

***Bostrychia calliptera* (Montagne) Montagne - *Bostrychia pinnata* J.Tanaka y M. Chihara**

Actualmente, *B. pinnata* es sinónimo de *B. calliptera* (Zuccarello y West, 2011). La identificación de la especie se basó en la descripción proporcionada por Marín-Salgado y Peña-Salamanca (2017). La especie consta de un talo muy ramificado, formando cojines de 5-7 cm de longitud, el diámetro del talo principal está entre 690-700 μm . Coloración roja a marrón. Presenta tres órdenes de ramas. Las ramas de primer orden o ejes principales, de 8–17 mm de longitud y un diámetro de 87–2047 μm , se originan desde el talo principal y se ramifican de forma dicotómica o policótoma. En los ejes rastreros presentan hápteros en la cara inferior de las ramificaciones, que sirven como estructuras de fijación al sustrato. Las ramas son de inserción dística, de ramificación simple y crecimiento limitado, corticadas en las partes basales y medias, y polisifónicas hasta los ápices. Los *Branchlets* (ramas de segundo orden) son polisifónicos y no ramificados, de 4–7 mm de longitud; el último segmento apical es monosifónico y más largo que las células adyacentes (125–155 μm). Las ramitas (ramas de tercer orden), de 2–3 mm de longitud y 35–452 μm de diámetro, se hacen más cortas hacia el ápice. La abundancia de estas y su incurvación hacia los ejes principales les otorgan un aspecto plumoso característico a las ramificaciones. Células pericentrales entre 200-315 μm de diámetro (Fig 4; 1a, 1b). Individuos reproductivos con

estiquidios tetrasporangiales cónicos, generalmente en el ápice de las ramitas entre 900- 4000 μm de longitud (Fig 4; 1c).

***Bostrychia moritziana* (Sonder ex Kützinger) J.Agardh - *Bostrychia radicans* (Montagne) Montagne**

Actualmente, esta morfoespecie presenta cripticidad, encontrándose en el morfotipo *B. moritziana/radicans* (Zuccarello y West, 2011). De coloración roja a marrón. Presenta tres niveles de ramificación. Los ejes primarios son polisifónicos, con longitudes entre 5 y 23 mm, y se originan a partir del talo principal, alcanzando un diámetro de 65–1,869 μm . Los *Branchlets* o ramas de segundo orden, también polisifónicos, miden entre 2 y 10 mm de longitud y generan ramitas alargadas de tercer orden, de 0,1–7 mm de largo y 107–750 μm de diámetro. Las ramificaciones presentan disposición dística con inserción alterna, son erguidas, de ápice agudo y levemente incurvadas hacia el eje. La célula apical posee una longitud de 113–252 μm (Fig 4; 2a).

Individuos reproductivos tetraesporofíticos cónicos con una longitud de 4.000-5.000 μm y un grosor de 1.000-2.000 μm . Sus estiquidios están caracterizados por un ensanchamiento de la zona apical de las ramitas donde se ubican decenas de tetrasporas con un diámetro aproximado de 300 μm de forma redondeada, coloración oscura y tamaño variable según estado de maduración; presenta fisuras que dividen la estructura en tres (Fig 4; 2b).

Composición algal

Las muestras identificadas, fueron lavadas con agua destilada para eliminar impurezas y restos superficiales, se retiró el exceso de agua y se pesaron en estado húmedo. Posteriormente, se secaron en horno a 60°C durante 5 horas, asegurando su completa deshidratación. Una vez secas, se obtuvieron los pesos secos correspondientes para cada muestra, tanto en la altura alta como en la

baja, permitiendo establecer diferencias en la distribución de biomasa en función de la altura en la raíz. Los índices de diversidad fueron calculados con la librería en *vegan* en el *software R* con *RStudio 4.5.2*. Los gráficos fueron realizados en Hojas de Cálculo de *Drive* y las figuras ilustrativas en el programa *Biorender.com*.

Experimento del efecto de la salinidad en la variabilidad de MAAs con material vivo de *B. calliptera*.

Aclimatación:

El material recolectado fue dispuesto en peceras con agua de mar estéril a 15 ppm (partes por mil), preparada con agua destilada estéril y sal marina *Reef Crystals® Reef Salt*. La aireación se realizó mediante bombas conectadas a mangueras de flujo de aire controlado. Las muestras fueron aclimatadas durante una semana, y posteriormente se efectuó un recambio con adición de medio nutritivo F2 rebajado al 25%, manteniéndose así por una semana adicional.

Fase experimental:

Se establecieron cuatro tratamientos de salinidad (5, 15, 35 y 55 ppm), donde 15 ppm correspondió al tratamiento control, correspondiente a la salinidad registrada en campo durante la colecta (tabla 1). Las condiciones hiposalinas e hipersalinas se definieron según Bourburema et al. (2024) y Karsten et al. (1996) (Figura 2). Se manejaron tres réplicas por cada tratamiento, para un total de 12 unidades experimentales (4 tratamientos $\times$ 3 réplicas). En cada frasco de 500 ml se colocaron aproximadamente 5 gramos de biomasa algal húmeda, con 400 ml del medio F2 rebajado al 25%, como se describe en la metodología de Bourburema *et al.* (2024), con su respectivo tratamiento de salinidad. Posteriormente, se completó el volumen hasta el aforo. La aireación del cultivo fue garantizada mediante el uso de bombas de aire, conectadas a mangueras colocadas al interior de

los frascos, que fueron tapados con algodón estéril y una cubierta de papel aluminio. El experimento tuvo una duración de una semana, en vista de que la síntesis de metabolitos de las algas puede llevarse a cabo en cuestión de horas ante estrés salino en macroalgas rojas, según un estudio de Gambichler et al. (2021). Posteriormente, se realizó la identificación de metabolitos mediante HPLC.

Extracción de metabolitos.

Las muestras secas fueron maceradas levemente para fracturar las ramas de las algas. El material identificado como *B. calliptera* fue sometido a un proceso de extracción utilizando etanol grado analítico. Las muestras fueron colocadas en frascos de vidrio estériles, a los que se añadieron 60 ml de etanol. El solvente se dejó actuar durante una semana y posteriormente se extrajo mediante filtración por gravedad para eliminar impurezas. Los frascos fueron sometidos a zonificación durante 5 minutos y después se filtró nuevamente el extracto.

La separación del solvente del extracto algal se realizó mediante una rotaevaporadora (modelo IKA® RV 10), manteniendo una presión de 175 mbar, una velocidad de rotación de 80 rpm y una temperatura de 60 °C durante cinco minutos por muestra. El extracto resultante fue filtrado para eliminar cualquier residuo algal y luego se secó en plancha durante una semana para asegurar la completa evaporación del solvente.

Análisis de Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (HPLC).

El análisis de los metabolitos fue realizado mediante cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC, por sus siglas en inglés) de la marca Shimadzu, en el laboratorio del Grupo de Investigación en Productos Naturales (GIPNA) del Departamento de Química de la Universidad del Valle, Cali (Colombia). Los extractos a 10.000 ppm de concentración fueron preparados con

etanol grado analítico en baño de ultrasonido durante 10 minutos y filtrados utilizando filtros de membrana de 0.22 μm . De cada muestra, 10 μL se inyectaron en una columna C18 (Prontosil 120-5-C18; 120 $\text{\AA}$, 5 μm , 125 $\times$ 4.0 mm; Bischoff Chromatography, Alemania) a 32°C. Durante las mediciones, la fase móvil estaba constituida de metanol al 2,5 % (v/v) con ácido acético al 0,1 % (v/v) a un flujo de 0,5 ml/min, siguiendo la metodología de Bourburema et al. (2022) para la extracción de MAAs. La identificación tentativa de los MAAs se realizó mediante comparación de los tiempos de retención y espectros de absorción de cada uno de los cromatogramas de las muestras, se compararon con diferentes estudios donde se identificaron estos metabolitos y fueron documentados en diagramas de barras realizados en el software *R* con *RStudio 4.5.2* (Carreto, Carignan y Montoya, 2005; Carreto y Carignan, 2011; Orfanoudaki *et al.*, 2019, 2021; Rosic, 2019; Orfanoudaki, Hartmann, Ngoc, *et al.*, 2020; Gambichler, Zuccarello y Karsten, 2021; Borburema *et al.*, 2022).

RESULTADOS

Composición ecológica de especies del complejo *Bostrychietum*.

En este estudio se documentaron cinco especies de macroalgas asociadas a las raíces de *R. mangle* en un manglar de la costa Pacífica de Colombia, distribuidas en dos filos: Chlorophyta y Rhodophyta, de las clases Ulvophyceae y Florideophyceae. Dentro de ellos, tres órdenes, cuatro familias y cuatro géneros. El Orden Ceramiales (compuesto por dos familias y dos géneros) presentó el mayor número de individuos con tres especies. Por su parte Orden Cladophorales y Gigartinales solo presentaron una especie cada uno (Tabla 2).

La zonación vertical de las morfoespecies de macroalgas epífitas observadas sobre raíces de mangle, es dividida en dos secciones: Zona A (superior) y Zona B (inferior), como se representa

en la figura 6. Además, se observa un patrón diferencial en la composición y dominancia relativa de las algas entre ambas zonas, como se observa en los pesos y frecuencia relativa de la tabla 3. En la figura 6, en la Zona A (zona alta) domina *B. calliptera* con 56,1% de la biomasa relativa (calculada a partir de los datos de la tabla 3), seguida por *C. lepriurii* (31,2%), *C. caespitosa* (8,5%) y una fracción menor de *B. moritziana* (4,2%). *R. riparium* no fue registrado en esta zona alta. En Zona B (zona baja) la dominancia de *B. calliptera* disminuye a 51,7%, mientras que *C. lepriurii* aumenta su participación a 36.1%. Además, se registran *C. caespitosa* (5,8%), *R. riparium* (5.2%) —presente únicamente en la parte baja— y una muy baja proporción de *B. moritziana* (1,2%).

Los índices ecológicos revelaron diferencias entre las dos zonas ($p < 0,05$). El índice de Shannon mostró una diversidad moderada en ambas áreas, con un valor ligeramente mayor en la zona Baja ($H' = 1,08$) respecto a la zona Alta ($H' = 0,98$). De manera consistente, el índice de Simpson (D) fue menor en la zona Baja ($D = 0,361$) que en la zona Alta ($D = 0,404$). Esto se confirma con el índice de diversidad de Simpson ($1 - D$), que fue mayor en la zona Baja (0,639) que en la zona Alta (0,596).

Análisis por HPLC para detección de MAAs en muestras de *B. calliptera*.

La composición y abundancia relativa de los MAAs variaron entre las muestras colectadas en ambas zonas de la raíz de *R. mangle* (Alta y Baja) y los tratamientos de salinidad (5, 15, 35 y 55ppm) aplicados a *B. calliptera* (Fig. 7, 8 y 9). Se agruparon e identificaron los picos cromatográficos de acuerdo a su tiempo de retención y absorbancia, buscando en literatura los posibles MAAs que representaban (Tabla 4).

Se encontró que el compuesto sin identificar denominado “MAA_1”, con un Tiempo de Retención (TR) de 3,36 min y Absorbancia UV (A) de 319 nm, estuvo presente tanto en la zona de colecta Alta y Baja, como en todos los tratamientos de salinidad (Tabla 4). Representando más del 70% de la abundancia relativa, salvo en la zona Alta, donde representó el 49% del total de esta muestra (Fig. 7). Esta baja proporción en la zona Alta debido a que se identificó *Mycosporine-glycine* de acuerdo con Parailoux *et al.* (2020). Con un TR promedio de 3,99 min y A de 309 nm, encontrándose bastante abundancia en zona Alta, representando el 33,9% de la muestra total, comparado con una menor proporción en los tratamientos a 15 y 35 ppm (<1% abundancia).

El MAA *Palythine*, también identificado en Borburema *et al.* (2022). Estuvo presente en todas las muestras, con un TR de 4,94 min y A 320 nm. Se observa una disminución de la abundancia relativa de este MAA con el aumento de la salinidad, pasando del 20% en 5 ppm a 12% en 55 ppm. De igual forma en la zona Baja estuvo a mayor abundancia relativa, representando el 24%, mientras que en la zona Alta se estimó un 14% de la abundancia total. Por su parte, un derivado llamado *Palythine-serine*, se identificó con Carignan *et al.* (2009) con un TR de 4,24 min y A 317 nm. Derivado presente solo en condiciones salinas medias y altas (35 y 55 ppm).

En menores proporciones se identificaron dos MAAs adicionales, presentes exclusivamente en la zona Alta y en el tratamiento hipersalino (55 ppm). Fueron denominados MAA_2 y MAA_3, con un TR de 3,62 min y 4,33 min, y A 314 nm y 318 nm, respectivamente. Su contribución relativa al total de metabolitos fue baja: MAA_2 representó aproximadamente el 3% del perfil químico en la zona Alta, mientras que MAA_3 aportó cerca del 5% en el tratamiento 55 ppm.

DISCUSIÓN

La supervivencia de *B. calliptera* en ecosistemas estuarinos altamente variables depende de su capacidad para tolerar fluctuaciones ambientales extremas, especialmente en condiciones de estrés osmótico, desecación, radiación solar intensa y altas temperaturas (Karsten *et al.*, 1996; Karsten, 2012; Gambichler, Zuccarello y Karsten, 2021). Estos ambientes demandan mecanismos fisiológicos robustos que permitan mantener la homeostasis celular a pesar de los cambios drásticos en salinidad y humedad, entre los cuales los metabolitos como MAAs destacan como elementos clave (Carreto, Carignan y Montoya, 2005; Lalegerie *et al.*, 2019; Orfanoudaki *et al.*, 2019). En este sentido, los resultados de este estudio, que muestran la presencia y variación de MAAs bajo gradientes de salinidad, aportan evidencia de que estos compuestos podrían desempeñar un papel determinante en la tolerancia fisiológica y, por ende, en la zonación vertical de *B. calliptera* en los manglares.

Aunque tradicionalmente los MAAs se han descrito como compuestos fotoprotectores frente a la radiación UV (Karsten *et al.*, 1996; Orfanoudaki *et al.*, 2019, 2019; Angulo-Núñez *et al.*, 2025), diversos estudios han ampliado su papel, indicando que también funcionan como osmoprotectores, antioxidantes y agentes de mitigación del estrés por desecación (Carreto, Carignan y Montoya, 2005; Karsten, 2012; Sánchez De Pedro *et al.*, 2016; Diehl *et al.*, 2019; Lalegerie *et al.*, 2019; Orfanoudaki *et al.*, 2019, 2021; Rosic, 2019; Gharib, Tabarзад y Hosseinabadi, 2020; Orfanoudaki, Hartmann, Kamiya, *et al.*, 2020, 2020; Boucar *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021; Angulo-Núñez *et al.*, 2025).

La presencia de MAAs en todos los tratamientos de este estudio (tabla 4), y su mayor variabilidad bajo altas salinidades (Fig. 7), coincide con la evidencia que sugiere que estos compuestos cumplen

una doble función. Por un lado, contribuyen a la protección UV en escenarios de alta irradiancia asociados a la marea baja. Y por el otro, participan en la regulación osmótica y la defensa antioxidante frente al estrés salino y oxidativo. Por tanto, la detección de estos metabolitos en organismos bajo diferentes niveles de salinidad, respalda la idea de una respuesta fisiológica multifactorial frente a las condiciones de estrés múltiple presentes durante la marea alta y baja (Gharib, Tabar zad y Hosseinabadi, 2020, p. 2022; Orfanoudaki, Hartmann, Kamiya, *et al.*, 2020; Borburema *et al.*, 2022, 2024; Urrea-Victoria *et al.*, 2023, 2023; Al Qoh *et al.*, 2025; Angulo-Núñez *et al.*, 2025).

A pesar de que las concentraciones de MAAs suelen ser inferiores a las necesarias para equilibrar completamente el estrés osmótico, se ha propuesto que funcionan como osmolitos suplementarios junto con otros solutos como polioles y betainas (Orfanoudaki *et al.*, 2019). En la microalga *Desmodesmus* sp. Y la cianobacteria *Anabaena variabilis* se observó síntesis de MAAs bajo estrés hipersalino (30 ppm) a 320 nm, mientras que cultivadas sin adición de sal (NaCl), estos metabolitos no fueron producidos (Gharib, Tabar zad y Hosseinabadi, 2020). Resultados similares se presentan en este estudio, donde a un mismo espectro de absorción (320 nm) y usando una columna C18 de tamaño de partícula igual (5 µm), los metabolitos se detectaron en todos los tratamientos de salinidad, llegando a evidenciar un aumento en el número de MAAs en correlación con el aumento del gradiente de salinidad, sugiriendo una respuesta inducida por el estrés salino (Fig. 7).

Asimismo, se encontró posiblemente *Mycosporine-glycine* en la zona Alta de este estudio, que concuerda con hallazgos recientes (Rosic, 2019). Por su parte, en la cianobacteria halotolerante *Aphanothece halophytica*, la producción de *Mycosporine-2-glycine* se encontró en 310 nm y aumentó significativamente en alta salinidad, incluso más que bajo radiación UV-B. Esta respuesta se vincula con la regulación positiva de genes biosintéticos, apoyando la función de los MAAs

como solutos osmóticos (Rosic, 2019). La detección de MAAs que absorben alrededor de 309 – 310 nm se debe a que pertenecen a la familia de los oxo-MAAs (ciclohexona). Este anillo permite disipar la energía en calor inocuo, previniendo la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Lalegerie *et al.*, 2019; Rosic, 2019; Parailloux *et al.*, 2020).

El estrés por desecación y la exposición a altas salinidades suelen desencadenar la formación de ROS, generando estrés oxidativo y daño molecular en el ADN, proteínas y otras biomoléculas (Rosic, 2019; Raj *et al.*, 2021). Los MAAs actúan como antioxidantes y captadores de radicales libres, disminuyendo el daño oxidativo y contribuyendo a la supervivencia celular (Orfanoudaki *et al.*, 2019; Gharib, Tabarзад y Hosseinabadi, 2020). La evidencia presentada en este estudio concuerda con esta función, puesto que la presencia de MAAs en las muestras colectadas en ambas zonas de las raíces de manglar podría estar relacionada con la necesidad de contrarrestar el estrés oxidativo (Rosic, 2019).

En esta investigación, la mayor variabilidad de MAAs se obtuvo en la zona Alta (Fig. 7). Esto concuerda con los resultados ecológicos, donde *B. calliptera* fue dominante en la zona Alta comparándose con la zona Baja ($D = 0,404$ vs. $0,361$). Se explica porque durante la marea baja (emersión), las macroalgas quedan expuestas directamente a la luz solar, con niveles máximos de radiación fotosintéticamente activa (PAR) y radiación ultravioleta (UVR) (Gharib, Tabarзад y Hosseinabadi, 2020). Esta emersión puede prolongarse hasta 12 horas durante las mareas vivas, haciendo que las algas enfrenten estrés por desecación y fluctuaciones de temperatura elevada (Sánchez de Pedro *et al.*, 2017; Gharib, Tabarзад y Hosseinabadi, 2020).

En los MAAs, la capacidad para disipar la energía UV absorbida en forma de calor, sin generar reacciones fotoquímicas, explican su eficacia como protectores pasivos (Nishida *et al.*, 2020). En

concreto, se ha reportado que la presencia de *Palythine* permite absorber radiación UVA intensa debido a la configuración cis-trans de su doble enlace (Geraldés y Pinto, 2021). En este estudio, se encontró *Palythine* tanto en la zona Alta y Baja, como en todos los tratamientos de salinidad. Cabe resaltar que las muestras colectadas en campo fueron las que tuvieron mayor abundancia de *Palythine* (Fig. 7), con casi el doble de la abundancia relativa (área del pico) en la zona Alta (Fig. 8). Esto podría explicarse debido al estrés multivariado en las muestras en campo comparado con un único estrés presente en los tratamientos de salinidad. (Nishida *et al.*, 2020).

De manera consistente con estos resultados, estudios previos sobre el perfil fitoquímico del linaje 3 de *B. calliptera* de Buenaventura, también incluía metabolitos como *Palythine-threonine* y *porphyra-334*, y una mayor abundancia de compuestos bromados, reflejando una inversión metabólica considerable asociada con la tolerancia a condiciones extremas (Orfanoudaki, Hartmann, Ngoc, *et al.*, 2020). En concordancia, este trabajo reporta posiblemente el metabolito *Palythine* y su derivado *Palythine-serine* con máximos de absorbancia de 320 y 317, respectivamente (tabla 4). Estos metabolitos complementan el papel principal de los polioles como dulcitol y sorbitol, en la regulación osmótica durante procesos de desecación, reforzando la estrategia metabólica integral de la especie frente al estrés ambiental (Orfanoudaki *et al.*, 2019; Borburema *et al.*, 2022, 2024).

En cuanto a la estructura comunitaria, los índices ecológicos reflejan patrones claros de zonación vertical. La zona baja presentó mayor diversidad (Shannon 1,08) que la zona alta (0,98), lo cual coincide con estudios que señalan que la menor exposición a desecación y radiación en niveles inferiores favorece la coexistencia de más especies (Sánchez De Pedro *et al.*, 2016). De manera similar, el índice de Simpson (0,361 en baja vs. 0,404 en alta) indica una comunidad más equitativa y menos dominada por una sola especie en la zona Baja. La riqueza también fue mayor en la zona

baja (5 especies vs. 4 en la zona Alta), lo que sugiere que las condiciones físicas y fisiológicas más estables permiten una mayor diversidad de macroalgas (Karsten, 2012; Borburema *et al.*, 2022, 2024; Urrea-Victoria *et al.*, 2023). Estos hallazgos coinciden con la estratificación vertical descrita por Peña-Salamanca (2008), donde se ha propuesto que la distribución se relaciona con gradientes de salinidad, radiación y humedad.

Identificar que *B. calliptera* resiste mayores periodos de desecación durante la marea baja, también se ve reforzada por estudios que muestran adaptaciones foto-fisiológicas en especies del género, incluyendo ajustes pigmentarios y respuestas fotosíntesis-irradiancia que favorecen su supervivencia en ambientes altamente iluminados (Sánchez de Pedro, 2017; Lalegerie *et al.*, 2019; Orfanoudaki, Hartmann, Kamiya, *et al.*, 2020; Orfanoudaki, Hartmann, Ngoc, *et al.*, 2020; Borburema *et al.*, 2022; Urrea-Victoria *et al.*, 2023; Angulo-Núñez *et al.*, 2025).

La comparación con registros de más de 15 años, como los de Peña-Salamanca (2008), que reportaron mayor abundancia relativa de *C. caespitosa* en zonas medias, sugiere que los cambios climáticos recientes, junto con factores locales como la desembocadura del río Dagua y la influencia de actividades antropogénicas asociadas al principal puerto del Pacífico colombiano, podrían estar modificando la distribución y abundancia de las especies (Vivas *et al.*, 2014).

Los hallazgos de esta investigación sustentan la hipótesis de que los MAAs contribuyen a la tolerancia fisiológica que le permite a *B. calliptera* dominar y persistir en las zonas superiores del intermareal. Por lo tanto, estos metabolitos cumplen una doble función esencial en el hábitat intermareal: por un lado, actúan como osmolitos suplementarios y antioxidantes, mitigando el estrés salino e inhibiendo el daño oxidativo provocado por la desecación y la salinidad; por otro lado, mantienen su papel primario como protectores UV en las zonas de alta irradiancia (Sánchez

De Pedro *et al.*, 2016; Lalegerie *et al.*, 2019; Orfanoudaki *et al.*, 2019, 2020, 2021; Borburema *et al.*, 2022; Urrea-Victoria *et al.*, 2023; Al Qoh *et al.*, 2025). Finalmente, la existencia de un sistema integrado de defensa metabólica en *B. calliptera*, donde los MAAs complementan la acción de otros osmolitos como los polioles, explica su éxito ecológico y su capacidad para persistir en las condiciones de estrés múltiple que caracterizan a los manglares tropicales (Urrea-Victoria *et al.*, 2023; Borburema *et al.*, 2024).

Investigaciones futuras podrían explorar con mayor detalle la interacción conjunta entre salinidad, irradiancia y disponibilidad de agua en la biosíntesis de MAAs, así como su relación con otros mecanismos osmoprotectores. En conjunto, este trabajo contribuye a comprender mejor las estrategias adaptativas de *B. calliptera* y su capacidad para persistir en ecosistemas altamente variables y críticamente amenazados como los manglares tropicales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al laboratorio del “*Grupo de Investigación en Productos Naturales y Alimentos (GIPNA)*” de la Universidad del Valle por la realización de las pruebas técnicas y análisis de los resultados. En específico, al profesor Gerson Dirceu, por su acompañamiento imprescindible y dirección en los análisis químicos. También al profesor José Hipólito y a Daniel Amaya, por la corrida de las muestras en el equipo.

De igual forma al laboratorio de Fisiología de la Universidad del Valle por brindarme un espacio de trabajo, en especial al profesor Enrique Peña por aportarme sus conocimientos en la planeación, realización y finalización de esta investigación. También agradezco a Cristina Zúñiga, por su compañía y consejo incondicional en todo momento.

LITERATURA CITADA

- Al Qoh, S. et al. (2025) «Investigation of UV protection and anti-aging properties of mycosporine-like amino acids in the Moroccan red alga *Gracilaria gracilis* (Gracilariales, Rhodophyta)», *Journal of Applied Phycology*, 37(2), pp. 1341-1356. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-024-03406-8>.
- Angulo-Nuñez, E. et al. (2025) «Photoprotective Potential of Mycosporine-Like Amino Acids in Red Algae (Rhodophyta) from San Andrés and Providencia Islands, Colombian Caribbean», *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 35(4), pp. 754-762. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s43450-025-00663-7>.
- Borburema, H.D.S. et al. (2022) «Photosynthetic performance, growth, pigment content, and photoprotective compounds of the mangrove macroalgae *Bostrychia calliptera* and *Bostrychia montagnei* (Rhodophyta) under light stress», *Frontiers in Marine Science*, 9, p. 989454. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.989454>.
- Borburema, H.D.S. et al. (2024) «Low molecular weight carbohydrate patterns of mangrove macroalgae from different climatic niches under ocean acidification, warming and salinity variation», *Marine Environmental Research*, 194, p. 106316. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106316>.
- Boucar, M.C.M. et al. (2021) «UV-B irradiation enhances the production of unique mycosporine-like amino acids and carotenoids in the subaerial cyanobacterium *Pseudanabaena* sp. CCNU1», *European Journal of Phycology*, 56(3), pp. 316-323. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09670262.2020.1824019>.
- Carignan, M.O. et al. (2009) «Palythine–threonine, a major novel mycosporine-like amino acid (MAA) isolated from the hermatypic coral *Pocillopora capitata*», *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 94(3), pp. 191-200. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2008.12.001>.
- Carpenter, R.C. (1990) «COMPETITION AMONG MARINE MACROALGAE: A PHYSIOLOGICAL PERSPECTIVE», *Journal of Phycology*, 26(1), pp. 6-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1990.00006.x>.
- Carreto, J.I. y Carignan, M.O. (2011) «Mycosporine-Like Amino Acids: Relevant Secondary Metabolites. Chemical and Ecological Aspects», *Marine Drugs*, 9(3), pp. 387-446. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md9030387>.
- Carreto, J.I., Carignan, M.O. y Montoya, N.G. (2005) «A high-resolution reverse-phase liquid chromatography method for the analysis of mycosporine-like amino acids (MAAs) in marine organisms», *Marine Biology*, 146(2), pp. 237-252. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00227-004-1447-y>.
- Davison, I.R. y Pearson, G.A. (1996) «STRESS TOLERANCE IN INTERTIDAL SEAWEEDS», *Journal of Phycology*, 32(2), pp. 197-211. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1996.00197.x>.
- Diehl, N. et al. (2019) «Stress metabolite pattern in the eulittoral red alga *Pyropia plicata* (Bangiales) in New Zealand – mycosporine-like amino acids and heterosides», *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 510, pp. 23-30. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2018.10.002>.
- Gambichler, V., Zuccarello, G.C. y Karsten, U. (2021) «Seasonal changes in stress metabolites of native and introduced red algae in New Zealand», *Journal of Applied Phycology*, 33(2), pp. 1157-1170. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02365-0>.
- Geraldes, V. y Pinto, E. (2021) «Mycosporine-Like Amino Acids (MAAs): Biology, Chemistry and Identification Features», *Pharmaceuticals*, 14(1), p. 63. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ph14010063>.

- Gharib, R., Tabarzad, M. y Hosseinabadi, T. (2020) «Effect of High Salinity on Mycosporine-Like Amino Acid Production in *Desmodesmus* sp.: MAA production in *Desmodesmus* sp.», Trends in Peptide and Protein Sciences, 5(Vol. 5 (2020): online in progress), pp. 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.22037/tpps.v5i0.28876>.
- Karsten, U. et al. (1996) «Physiological responses of the eulittoral macroalga *Stictosiphonia hookeri* (Rhodomelaceae, Rhodophyta) from Argentina and Chile: salinity, light and temperature acclimation», European Journal of Phycology, 31(4), pp. 361-368. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09670269600651591>.
- Karsten, U. (2012) «Seaweed Acclimation to Salinity and Desiccation Stress», en C. Wiencke y K. Bischof (eds.) Seaweed Biology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Ecological Studies), pp. 87-107. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-642-28451-9_5.
- Lalegerie, F. et al. (2019) «Photo-protective compounds in red macroalgae from Brittany: Considerable diversity in mycosporine-like amino acids (MAAs)», Marine Environmental Research, 147, pp. 37-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.04.001>.
- NIKITASHINA, V. y POHNERT, G. (2023) «Adaptation to salinity changes by phytoplankton: reassessing compositional changes of osmolytes in the light of modern analytical methods». Disponible en: <https://doi.org/10.21411/CBM.A.8EAA4B8>.
- Nishida, Y. et al. (2020) «Efficient Extraction and Antioxidant Capacity of Mycosporine-Like Amino Acids from Red Alga Dulse *Palmaria palmata* in Japan», Marine Drugs, 18(10), p. 502. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md18100502>.
- Orfanoudaki, M. et al. (2019) «Bostrychines A–F, Six Novel Mycosporine-Like Amino-Acids and a Novel Betaine from the Red Alga *Bostrychia scorpioides*», Marine Drugs, 17(6), p. 356. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md17060356>.
- Orfanoudaki, M., Hartmann, A., Kamiya, M., et al. (2020) «Chemotaxonomic Study of *Bostrychia* spp. (Ceramiales, Rhodophyta) Based on Their Mycosporine-Like Amino Acid Content», Molecules, 25(14), p. 3273. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules25143273>.
- Orfanoudaki, M., Hartmann, A., Ngoc, H.N., et al. (2020) «Mycosporine-like amino acids, brominated and sulphated phenols: Suitable chemotaxonomic markers for the reassessment of classification of *Bostrychia calliptera* (Ceramiales, Rhodophyta)», Phytochemistry, 174, p. 112344. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112344>.
- Orfanoudaki, M. et al. (2021) «Analysis of the Mycosporine-Like Amino Acid (MAA) Pattern of the Salt Marsh Red Alga *Bostrychia scorpioides*», Marine Drugs, 19(6), p. 321. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md19060321>.
- Parailloux, M. et al. (2020) «Untargeted Analysis for Mycosporines and Mycosporine-Like Amino Acids by Hydrophilic Interaction Liquid Chromatography (HILIC)—Electrospray Orbitrap MS2/MS3», Antioxidants, 9(12), p. 1185. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/antiox9121185>.
- Peña-Salamanca, E. (2017) «El complejo *Bostrychietum*: la flora de algas asociadas a las raíces del manglar en la costa pacífica colombiana», Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 41(160), p. 338. Disponible en: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.485>.

- Post, E. (1963) «Zur Verbreitung und Ökologie der *Bostrychia- Caloglossa* -Assoziation», *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, 48(1), pp. 47-152. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/iroh.19630480105>.
- Raj, S. et al. (2021) «Microalgae as a Source of Mycosporine-like Amino Acids (MAAs); Advances and Future Prospects», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(23), p. 12402. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph182312402>.
- Rincón-Díaz, N. et al. (2021) «Diversity of benthic macroalgae in the Colombian Pacific: a study of a rocky reef flora», *Nova Hedwigia*, 112(1-2), pp. 1-15. Disponible en: https://doi.org/10.1127/nova_hedwigia/2021/0618.
- Rosic, N. (2019) «Mycosporine-Like Amino Acids: Making the Foundation for Organic Personalised Sunscreens», *Marine Drugs*, 17(11), p. 638. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md17110638>.
- Sánchez De Pedro, R. et al. (2016) «Intraspecific phenotypic variation in two estuarine rhodophytes across their intertidal zonation», *Marine Biology*, 163(10), p. 221. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00227-016-2997-5>.
- Thomas, T.E., Turpin, D.H. y Harrison, P.J. (1987) «Desiccation enhanced nitrogen uptake rates in intertidal seaweeds», *Marine Biology*, 94(2), pp. 293-298. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF00392943>.
- Urrea-Victoria, V. et al. (2023) «Photosynthetic pigments and photoprotective metabolites of Colombian pacific marine macroalgae in response to contrasting ultraviolet-index periods», *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 564, p. 151908. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2023.151908>.
- Zhang, Z. et al. (2021) «New types of ATP -grasp ligase are associated with the novel pathway for complicated mycosporine-like amino acid production in desiccation-tolerant cyanobacteria»,
- Zuccarello, G.C. y West, J.A. (2011) «Insights into evolution and speciation in the red alga *Bostrychia*: 15 years of research», *ALGAE*, 26(1), pp. 21-32. Disponible en: <https://doi.org/10.4490/algae.2011.26.1.021>.

ANEXOS

Tabla 1. Comparación de los parámetros fisicoquímicos medidos con la sonda multiparamétrica (HANNA HI 9829) del agua de mar en dos horarios, mañana y tarde, del manglar “Quita calzon” en Buenaventura, Colombia.

Parámetros	Horario mediciones	
	8:00 a. m.	2:00 p. m.
pH (mV)	-4	-51,4
pH	6,29	7,6
Potencial redox ORP (mV)	121,7	131,7
% saturación de oxígeno (%DO)	97,2	100,1
Oxígeno disuelto (ppm DO)	6,52	7,72
Conductividad (mS/cm)	31,2	34,39
Conductividad (mS/cm^A)	-	38,59
Resistividad	0	0
Sólidos totales disueltos TDS (ppm)	15,6	17,15
Salinidad PSU	19,2	21,26
Turbidez (FNU) / Disco secchi (cm)	11,2	33,4
Temperatura T (°C)	30	31,2
PSI	-	14,71
Profundidad (m)	4,3	7,1

Tabla 2. Especies de macroalgas del manglar “Quita calzon” de la costa Pacífica colombiana, asociadas a las raíces de *R. mangle*.

Phylum	Clase	Orden	Familia	Especie
Chlorophyta	Ulvophyceae	Cladophorales	Cladophoraceae	<i>Rhizoclonium riparium</i>
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Rhodomelaceae	<i>Bostrychia calliptera/pinnata</i>
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Rhodomelaceae	<i>Bostrychia moritziana/radicans</i>
Rhodophyta	Florideophyceae	Ceramiales	Delesseriaceae	<i>Caloglossa leprieurii</i>
Rhodophyta	Florideophyceae	Gigartinales	Caulacanthaceae	<i>Catenella caespitosa</i>

Tabla 3. Datos de la composición ecológica de las morfoespecies identificadas del complejo *Bostrychietum*, colectadas a diferentes alturas de las raíces del manglar de la isla “Quita Calzón” en la localidad de Buenaventura.

Zona	Morfoespecie	Biomasa total	Freq. Relativa
Alta	<i>B. calliptera</i>	3,723	0,561
	<i>B. moritziana</i>	0,278	0,042
	<i>C. caespitosa</i>	0,566	0,085
	<i>C. leprieurii</i>	2,068	0,193
	<i>R. riparium</i>	0,000	0,000
Baja	<i>B. calliptera</i>	6,425	0,517
	<i>B. moritziana</i>	0,146	0,012
	<i>C. caespitosa</i>	0,725	0,058
	<i>C. leprieurii</i>	4,493	0,361
	<i>R. riparium</i>	0,651	0,052

Tabla 4. *Mycosporine-like Amino Acids* (MAAs) identificados en las muestras colectadas de *B. calliptera* a diferentes alturas de la raíz de *R. mangle* (altura baja y alta) y tratamientos para inducir estrés salino a diferentes concentraciones (ppm), con el espectro de absorbancia en la región UV.

MAAs	Tiempo de retención (min)	Absorbancia UV (nm)	Zona Baja (colecta raíz mangle)	Zona Alta (colecta raíz mangle)	T 5 ppm (Tratamiento salinidad)	T 15 ppm (Tratamiento salinidad)	T 35 ppm (Tratamiento salinidad)	T 55 ppm (Tratamiento salinidad)	Área promedio del pico cromatográfico en HPLC	Referencias
MAA_1	3,36	319	x	x	x	x	x	x	3.909.845	(Boucar <i>et al.</i> , 2021; Zhang <i>et al.</i> , 2021)
MAA_2	3,62	314	-	x	-	-	-	-	745.561	(Borburema <i>et al.</i> , 2022; Boucar <i>et al.</i> , 2021)
Mycosporine-glycine	3,99	309	-	x	-	x	x	-	2.682.220	(Parailloux <i>et al.</i> , 2020)
<i>Palythine-serine</i>	4,24	317	-	-	-	-	x	x	281.471	(Carignan <i>et al.</i> , 2009; Lalegerie <i>et al.</i> , 2019; Orfanoudaki <i>et al.</i> , 2019; Rosic, 2019; Parailloux <i>et al.</i> , 2020; Boucar <i>et al.</i> , 2021; Borburema <i>et al.</i> , 2022)
MAA_3	4,33	318	-	-	-	-	-	x	190.423	Borburema <i>et al.</i> , 2022; Boucar <i>et al.</i> , 2021;
<i>Palythine</i>	4,94	320	x	x	x	x	x	x	938.339	(Carignan <i>et al.</i> , 2009; Lalegerie <i>et al.</i> , 2019; Orfanoudaki <i>et al.</i> , 2019; Rosic, 2019; Parailloux <i>et al.</i> , 2020; Boucar <i>et al.</i> , 2021; Borburema <i>et al.</i> , 2022)

Figura 1. Mapa de localización de la zona de muestreo, proporcionado por la página © 2025 www.coordenadas-gps.com. Se muestra la isla “Quita Calzon”, en la desembocadura del río Dagua y sobre la isla, el punto de muestreo en azul.

Figura 2. Montaje experimental de *B. calliptera* a diferentes tratamientos de salinidad.

Figura 3. Vista superior macro y micro con escala para algas del filo Chlorophyta: *Rhizoclonium riparium* (1a; en estereoscopio a 10x, 1b; en microscopio 100x). Detalle general en estereoscopio a 10x del filo Rodophyta: *Caloglossa leprieurii* (2a) y *Catenella caespitosa* (3a).

Figura 4. Detalle general en estereoscopio (1a; a 10x). Vista micro de células corticales en el talo y estructuras reproductivas (1b; 1c a 100x) para *B. calliptera*. Detalle general en estereoscopio (2a; a 10x) y esporas en microscopio (2b; a 400x) para *Bostrychia moritziana/radicans*.

Figura 5. Diagrama de barras del peso (g) de las morfoespecies identificadas del complejo *Bostrychietum*, colectadas a dos alturas de las raíces de *R. mangle* de la isla “Quita Calzon” en la localidad de Buenaventura.

Figura 6. Ilustración de la composición de algas en la zonación vertical alta y baja en la raíz de *R. mangle* de la isla “Quita Calzon” en la localidad de Buenaventura (imagen propia, realizada con BioRender.com).

Figura 7. Gráfico de barras del Porcentaje del área promedio (%) de los picos generados por HPLC para diferentes compuestos reportados como *Mycosporine-like Amino Acids* (MAA) vs. Colecta en raíz (muestras colectadas a dos alturas de *R. mangle* y Tratamientos a diferentes salinidades de muestras de *B. calliptera* (5, 15, 35 y 55 ppm de salinidad)

Figura 8. Cromatogramas correspondientes a los diferentes tratamientos de salinidad a un espectro de absorbancia de 320 nm.

Figura 9. Espectros de absorción (nm) de cada pico cromatográfico como supuesto MAA identificado, con su respectivo tiempo de retención.



Figura 1.



Figura 2.

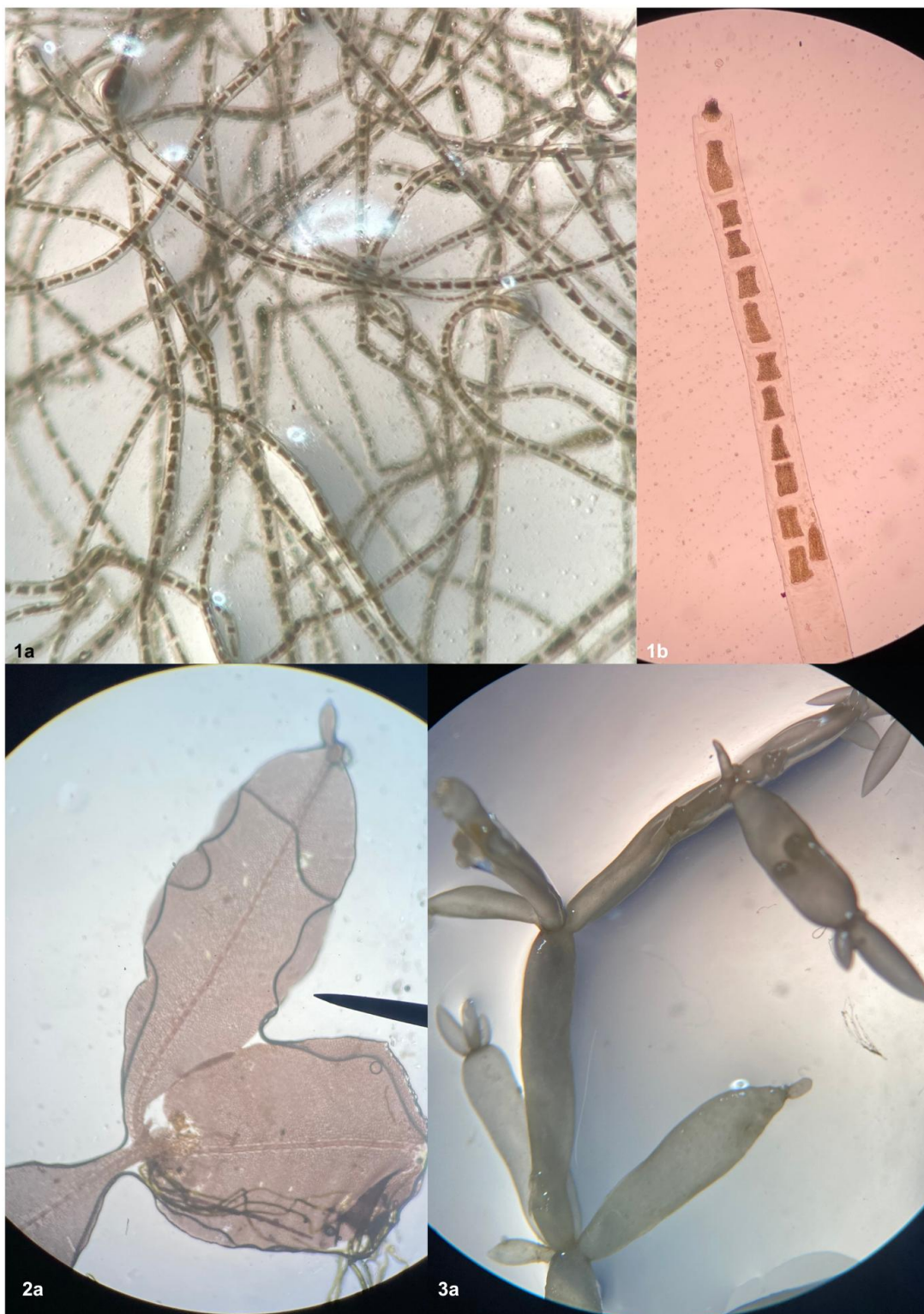


Figura 3.

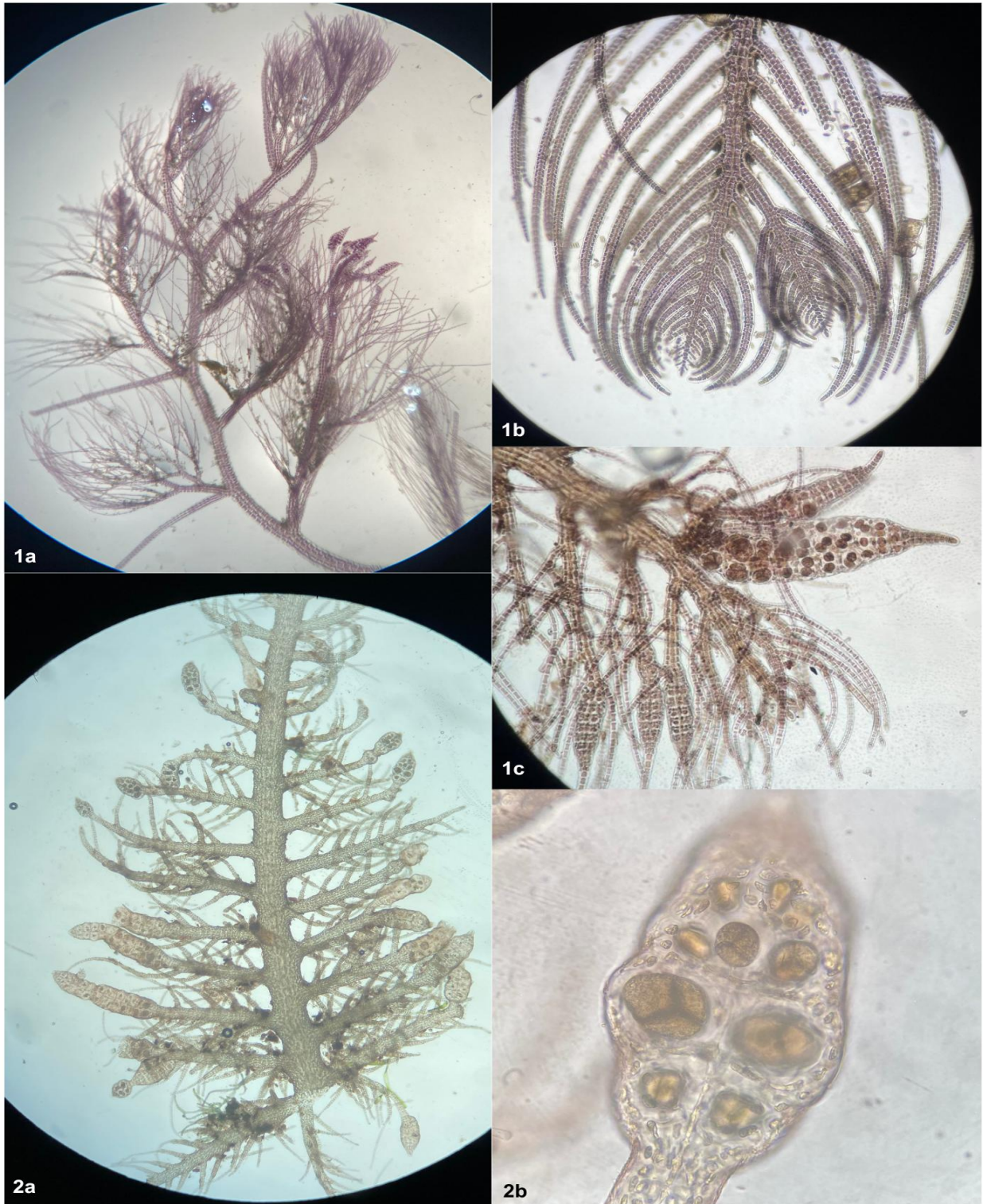


Figura 4.

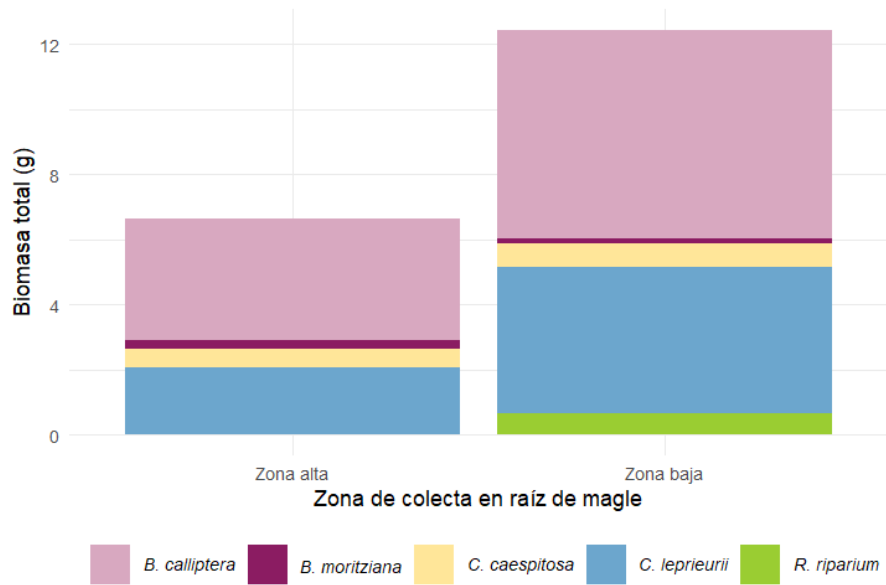


Figura 5.

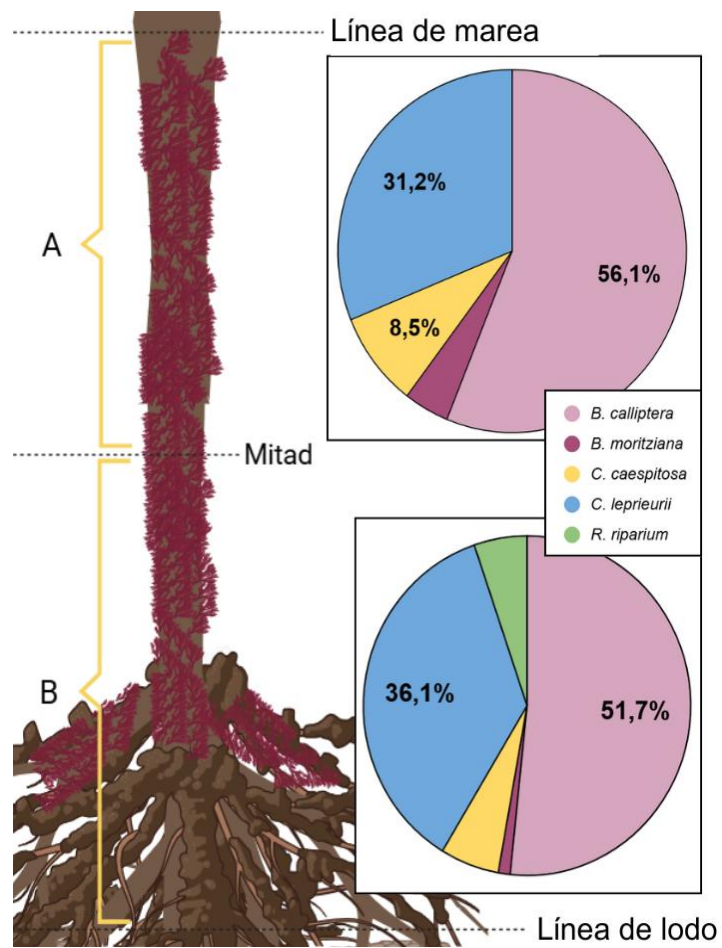


Figura 6.

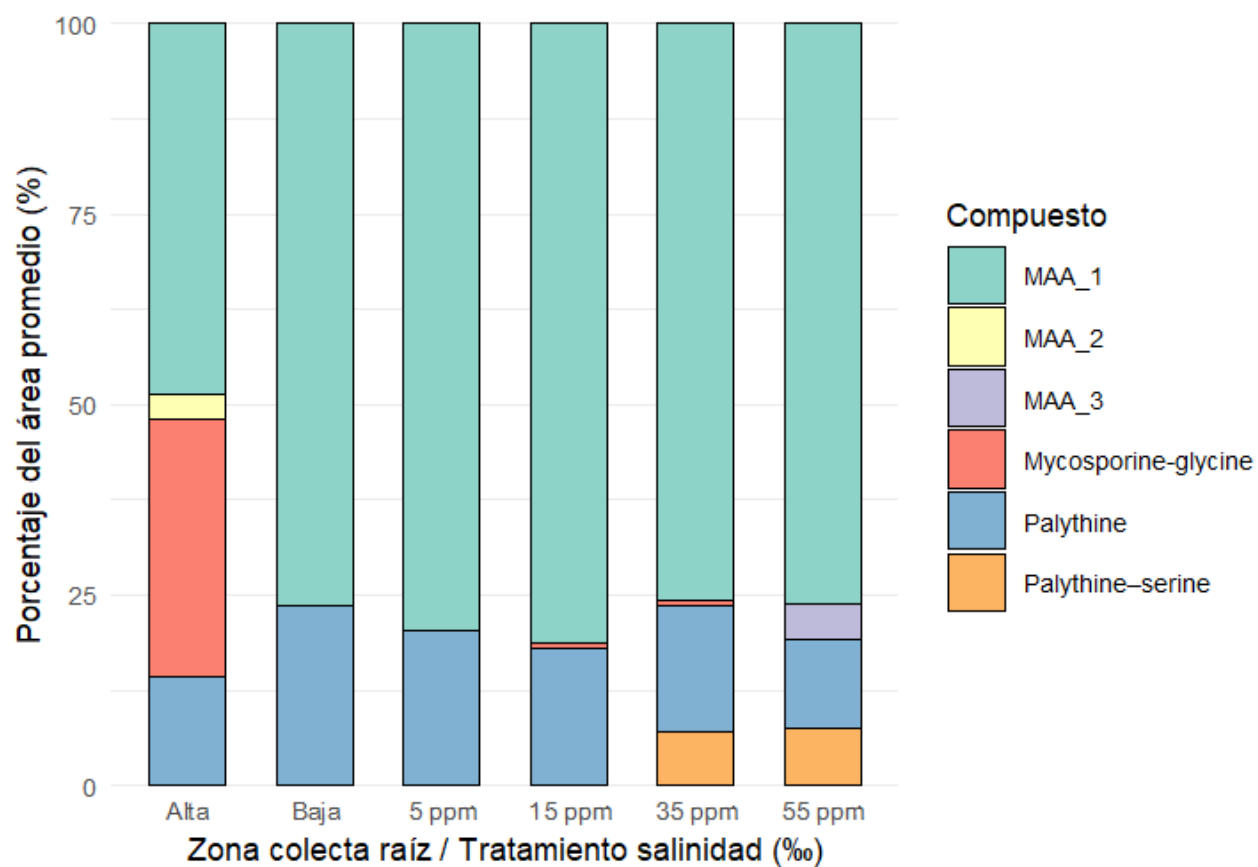


Figura 7.

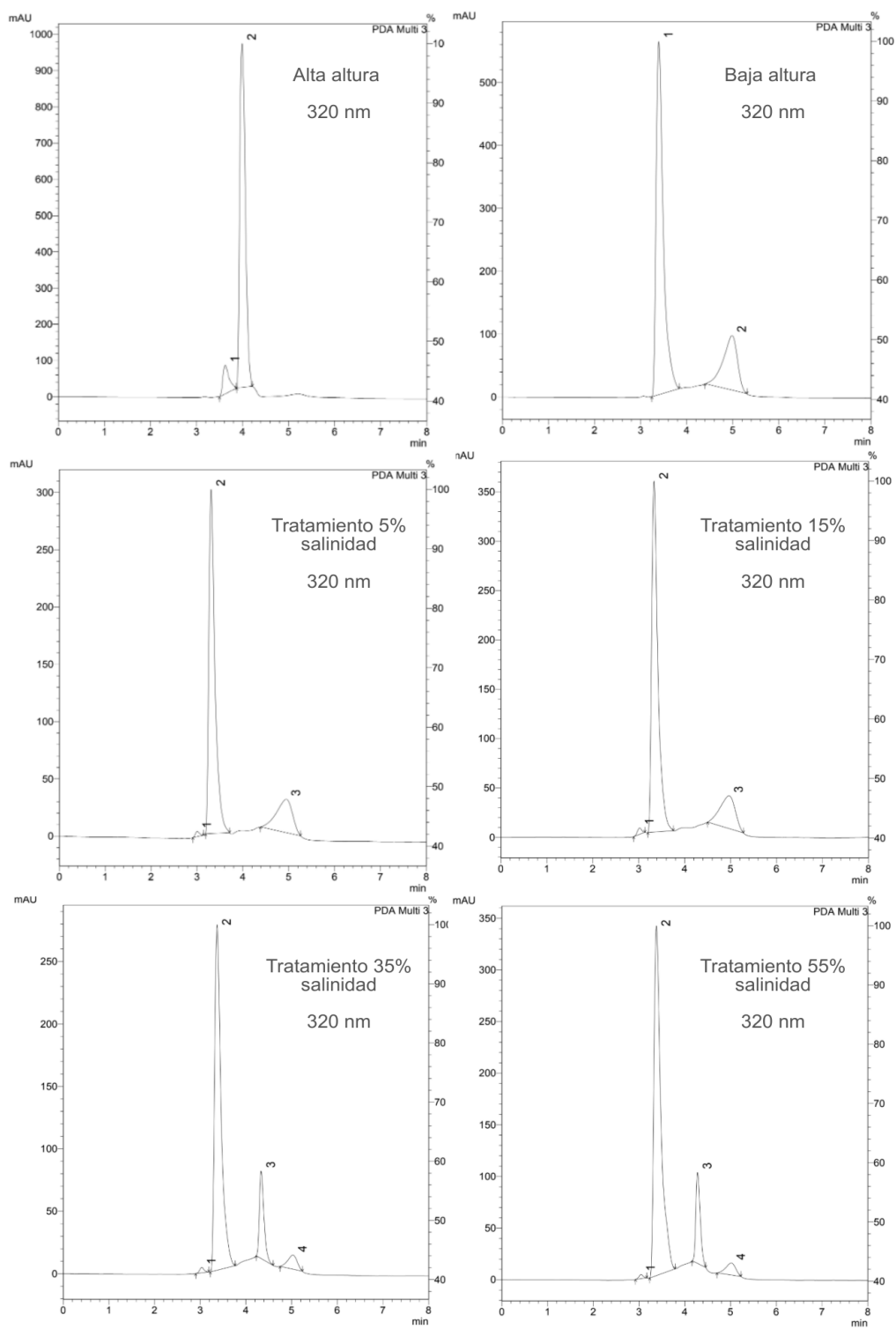


Figura 8.

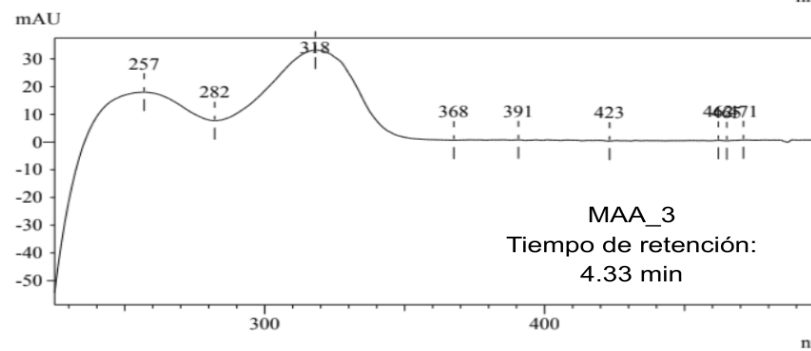
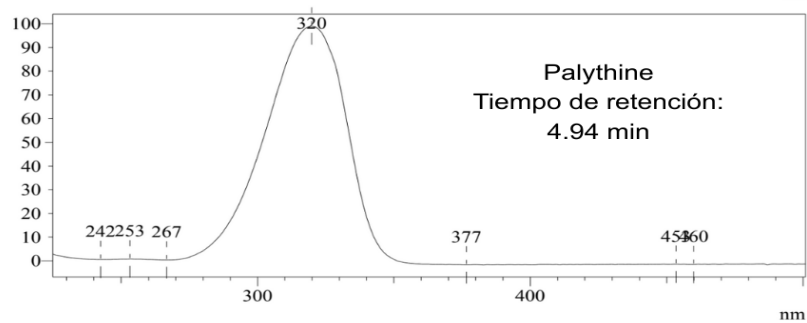
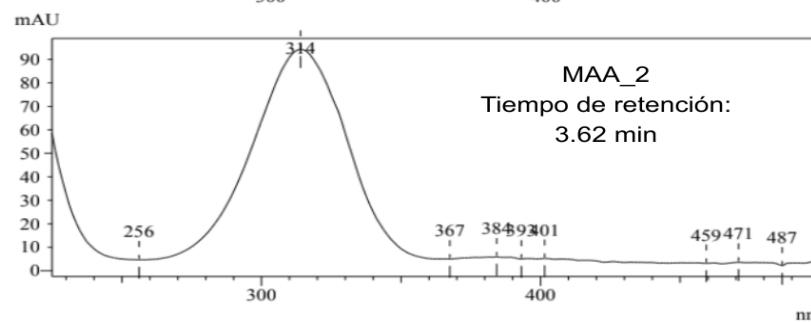
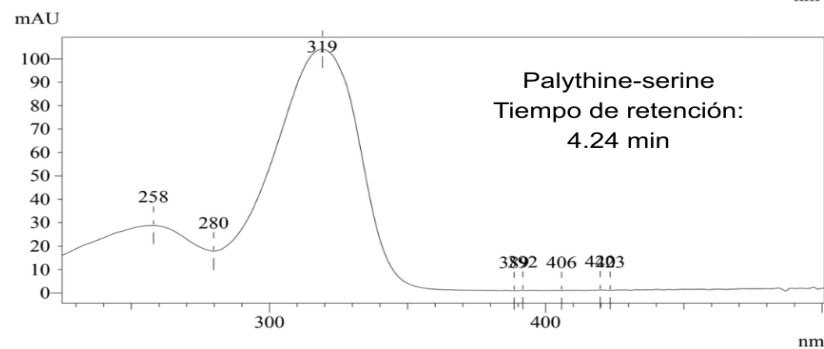
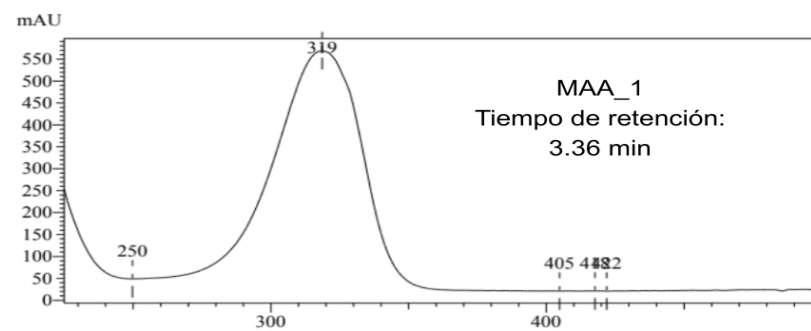
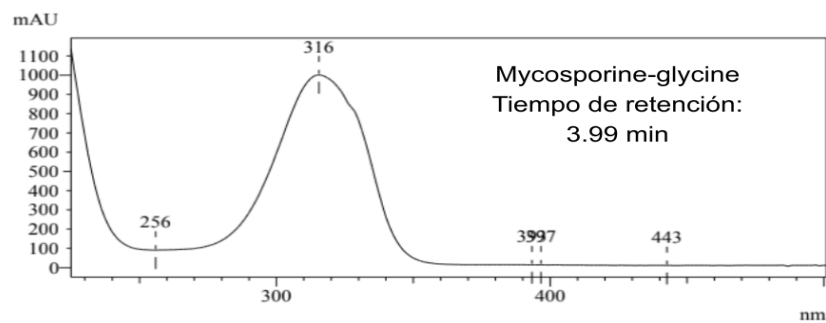


Figura 9.