



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

Tesis de Doctor en Geología

“Estructuras sedimentarias generadas por presencia de matas microbianas en un ambiente evaporítico costero. Procesos de formación y preservación.”

Geól. Lucia Maisano

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2019

Prefacio

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Geología, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Geología durante el período comprendido entre el 11/2014 y el 12/2018, bajo la dirección de la Dra. Diana G. Cuadrado.



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/..../..... , mereciendo la calificación de(.....)

A mis viejitos queridos, a Simón, Vic y Ezequiel

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de tesis Diana G. Cuadrado por darme la oportunidad de desarrollar el doctorado y por el apoyo recibido durante estos años de trabajo.

A mi familia querida, que sin su apoyo incondicional a través de los cinco años en Bahía, esto no hubiera sido posible.

A la Universidad Nacional del Sur (UNS) y en particular al Departamento de Geología, por aceptarme como estudiante de posgrado.

Al Instituto Argentino de Oceanografía (IADO) por facilitarme sus instalaciones y equipamiento para la realización de la tesis.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por las becas.

A todo el personal del IADO por la cordialidad que me brindaron desde el primer día de trabajo.

A todo el equipo del laboratorio de Petrotomía de la UNS por brindarme su conocimiento y la excelente predisposición al momento de trabajar.

A la cátedra de Geoquímica de la Universidad Nacional del Sur por facilitarme los análisis de Rayos X.

A Emma Quijada por brindarme su conocimiento, por sus consejos y todas las charlas compartidas.

A Jerónimo Pan por brindarme su conocimiento y consejos durante esta etapa.

A Jorge Spagnuolo por brindarme su conocimiento y material de trabajo.

A Eduardo Gómez por acompañarme a los viajes de campo y la excelente predisposición.

A todos mis compañeros de la biblioteca por crear un ambiente agradable de trabajo y por estar siempre dispuestos a darme una mano, especialmente a Sofi, Pitu y Noe.

Al equipo de Geología General de la UNS, entre ellos a Anita, Eli, Dani, Cari y Leo. Especialmente a Anita, gracias por la buena onda y excelente predisposición todos los días. También a Liliana Luna por sus consejos y facilitarme material de trabajo.

A Cari y Katy por su gran compañía y amistad.

A mis profesores Lucia, Sergio y Rami de la UNT por apoyarme en la decisión de hacer un doctorado.

A la familia Castro por su gran apoyo.

A Ezequiel por acompañarme cada día, por su comprensión y por ser mi compañero en la vida.

Resumen

Varias de las estructuras sedimentarias presentes en depósitos silicoclásticos fósiles no pueden ser explicadas solamente por procesos físicos. La interacción entre los sedimentos inconsolidados y los microorganismos que colonizan el sustrato puede explicar la generación de estas estructuras. La bioestabilización resultante de esta interacción modifica totalmente las propiedades físicas de los sedimentos. Por otro lado, la actividad biológica crea un microambiente que transforman las condiciones geoquímicas del medio (cambios de pH y Eh), produciendo la precipitación de minerales autigénicos que forman parte de los procesos iniciales en la diagénesis temprana.

En este trabajo se documentaron estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM) y más precisamente estructuras de deformación de gran tamaño en un ambiente evaporítico. El área de estudio corresponde a un antiguo canal de marea, donde su desembocadura al mar ha sido interrumpida por la formación de una espiga costera en la boca del canal. Este hecho ha generado la progradación de la costa con el consecuente aislamiento esporádico del canal. El área está expuesta a inundaciones del agua de mar en determinadas condiciones meteorológicas. Durante tormentas con vientos fuertes y olas que superan los 2 m de altura, en condiciones de sicigia, el nivel del mar sobrepasa la espiga y el agua de mar ingresa por la morfología preexistente, el paleocanal de marea. Las condiciones de calma entre las inundaciones permiten la colonización de los sedimentos formando espesas matas microbianas. El **objetivo del trabajo** es reconocer las estructuras microbianas de deformación en la planicie de marea y determinar los procesos de generación de cada una de ellas para la identificación de estructuras análogas en el registro fósil. Entre las estructuras de deformación más prominentes se han reconocido pliegues, enrollamientos y dobleces de mata microbiana. Los procesos de generación de estas estructuras responden a las corrientes canalizadas de agua de mar que ingresan al paleocanal caracterizadas por altas velocidades. Por otra parte, se han caracterizado los sedimentos de la planicie midiendo el pH, Eh, y también se ha medido la conductividad del agua de la capa freática, pH y Eh. Por medio de análisis petrográficos, microscopio electrónico de barrido (MEB) y difracción de rayos X (DRX) se identificaron delgadas láminas de precipitado carbonático en las matas microbianas. Este tipo de precipitación mineral promueve la preservación de las estructuras de deformación microbiana, de manera similar al ambiente carbonático.

La geomorfología es un factor fundamental en la formación de estructuras de deformación microbiana de gran escala. La morfología preexistente, un canal angosto y largo, influye en la canalización de corrientes de marea generando la fuerza suficiente para el desprendimiento de la mata microbiana y generación de estructuras de deformación. Este aspecto se debería tener en cuenta al momento de estudiar registros sedimentarios fósiles donde son característicos los eventos regresivos.

Abstract

Several of the sedimentary structures present in fossil silicoclastic deposits cannot be explained only by physical processes. These structures can be explained by the interaction between the unconsolidated sediments and the microorganisms that colonize the substrate. The biostabilization modifies the physical properties of the sediments. On the other hand, biological activity creates a microenvironment that transforms the geochemical conditions of the surrounding (changes in pH and Eh), producing the precipitation of authigenic minerals that are part of the initial processes in early diagenesis.

In this work, sedimentary structures induced by microbial activity (in Spanish ESIAM) and more precisely large deformation structures in an evaporitic environment were documented. The study area corresponds to an ancient tidal channel, where its inlet to the sea has been interrupted by a sand spit formation caused by NE longshore sediment transport along the coast. This fact has generated the progradation of the coast with the consequent sporadic isolation of the channel. The area is eventually flooded by seawater in certain oceanographic conditions. During storms with strong winds and waves that exceed 2 m in height, in spring tides, the sea level exceeds the sand spit, and the seawater enters by the pre-existing morphology, the tidal paleochannel. Calm conditions between floods allow the colonization of sediments forms thick microbial mats. The objective of the work is to recognize the microbial structures of deformation in the tidal plain and to determine the generation processes of each one of them for the identification of analogous structures in the fossil record. Folds, roll-ups and flip over mats have been recognized among the most prominent deformation structures. The generation processes of these structures respond to channeled seawater flows entering the paleochannel characterized by high speeds. Furthermore, the sediments of the plain have been described by measuring of the pH and Eh. Also, water conductivity, pH and Eh were measured in the water table. Thin layers of carbonaceous precipitate were identified in the microbial mats by petrographic analysis, scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD). This type of mineral precipitation promotes the preservation of microbial deformation structures, similar to the carbonate environment.

Geomorphology is a fundamental factor in the formation of large-scale microbial deformation structures. The pre-existing morphology, a narrow and long channel, influences the channeling of tidal currents, generating the enough force for the detachment of

the microbial mat and the generation of deformation structures. This situation must be into account when studying fossil records where regressive events are characteristic.

INDICE

ÍNDICE GENERAL

Resumen

Abstract

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Geobiología	1
1.2. Matas microbianas.....	2
1.3. Ambientes Silicoclásticos. Comparación con el ambiente carbonático.....	4
1.4. <i>Biofilm</i> y matas microbianas	5
1.5. Objetivo e Hipótesis	7

CAPITULO 2

2. ÁREA DE ESTUDIO	8
2.1. Geología de los alrededores de San Blas	9
2.2. Geomorfología de la región de San Blas.....	10
2.3. Geomorfología de la isla Jabalí.....	11
2.4. Paso Seco.....	12

CAPITULO 3

3. METODOLOGIA.....	15
3.1. Diseño de muestreo.....	15
3.1.1. Medición del nivel de agua.....	16
3.1.2. Medición de salinidad del agua.	17
3.1.3. Mediciones de pH, Eh y Temperatura en agua y sedimentos.....	17
3.2. Actividades de laboratorio y gabinete.....	18
3.2.1. Estudios hidro-sedimentológicos.....	18
3.2.2. Estudios sedimentológicos.....	18
3.2.3. Determinación de tamaño de sedimento.....	19
3.2.4. Determinación de humedad.....	20

3.2.5. Determinación de materia orgánica.....	20
3.2.6. Determinación de microorganismos en el sedimento con otros métodos	20
3.2.7. Confección de cortes delgados.....	21

CAPITULO 4

4. RESULTADOS	24
4.1. Hidrodinámica.....	24
4.1.1. Características de las inundaciones.....	24
4.1.2. Variaciones de la planicie en diferentes estaciones del año	30
4.1.3. Características del agua de mar: Salinidad, Eh, Ph y catión Ca	32
4.2. Características sedimentológicas de las biolaminitas.....	35
4.2.1. Sedimento colonizado.....	35
4.2.2. Granulometría	38
4.2.3. Eh, pH y Temperatura del sedimento	41
4.2.4. Contenido de humedad y materia orgánica del sedimento	44
4.2.5. Carbono total (CT).....	46
4.3. Petrografía	47
4.4. Análisis de Difracción de Rayos X	51
4.5. Análisis con Microscopio Electrónico de barrido (MEB) y Sistema de Microanálisis de rayos X por Energía Dispersiva (MEB- EDAX).....	53
4.6. Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana.....	56
4.6.1. Grietas de desecación.....	57
4.6.2. Domos de mata	57
4.6.3. Fragmentos de mata	59
4.6.4. Superficie de desgarro de mata	60
4.6.5. Doblez de mata microbiana	61
4.6.6. Remanente de mata microbiana y bolsillos de erosión.....	62
4.6.7. Pliegues de mata microbiana	63
4.6.8. Enrollamiento de mata microbiana	63
4.7. Relación de la hidrodinámica con las estructuras microbianas de deformación	

4.8. Recolonización	68
 CAPITULO 5	
5. DISCUSIÓN	70
5.1. Por qué es importante identificar la presencia de actividad microbiana en el sedimento?	70
5.2. Sedimento colonizado por matas microbianas de Paso Seco	72
5.3. Formación de matas epibentónicas	73
5.4. La hidrodinámica en relación con la superficie microbiana	76
5.5. Proceso de generación de estructuras sedimentarias de deformación.....	79
5.5.1. Etapa 1: Colonización del sedimento por matas microbianas	79
5.5.2. Etapa 2: Procesos físicos.....	79
5.5.3. Etapa 3: Proceso de licuefacción del sedimento infrayacente	82
5.6. Preservación de las estructuras sedimentarias microbianas.	84
5.6.1. Recolonización.....	84
5.6.2. Precipitación de minerales autigénicos	86
5.6.3. Precipitación de carbonato de calcio.....	88
5.7. Importancia de la geomorfología en la generación de estructuras microbianas de deformación	94
5.8. Comparación con estructuras de deformación en el registro sedimentario...97	
 CAPITULO 6	
6. CONCLUSIONES.....	99
BIBLIOGRAFIA	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema donde se ilustra el carácter interdisciplinario de la Geobiología (Modificado de Cady y Noffke, 2009). Traducción propia.	2
Figura 2.1. Mapa de localización de la zona de estudio Paso Seco (rectángulo). Modificado de Cuadrado y Gómez (2010).	8
Figura 2.2. a) Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la isla Jabalí. b) Mapa geomorfológico del área de estudio. c) Ubicación de área de estudio donde se	

discrimina la superficie estudiada. Se presenta un acercamiento de la zona por donde se produce el ingreso de agua al área de estudio d) Mapa del área estudiada donde se señala las estaciones de muestreo (St3 y St4). Modificado de Cuadrado <i>et al.</i> (2015).....	13
Figura 3.1. a) Localización del sensor de agua en la planicie de Paso Seco. b) Recolección de datos.	16
Figura 3.2. Procedimiento de ejecución de cortes delgados. a) El testigo fue dividido en dos partes, de forma longitudinal. b) Se dejó secar por varios días hasta perder la humedad. c) Colocación de la resina. d) Luego de impregnar la muestra se la coloca sobre una plancha por 24 horas. e) Se identifican segmentos del testigo para la formación de los tacos. f) Tacos sobre los que se realizaran los cortes delgados.	23
Figura 4.1. Registro de inundaciones medidas con el sensor HOB0. a). Inundaciones en la planicie en la St3. b) Inundaciones de la planicie en la St4. c). Relación entre la altura de ola, inundaciones registradas en junio de 2015, y pleamar pronosticada. ...	25
Fig. 4.2. Diferencias en el nivel del agua entre invierno y verano.	26
Figura 4.3. Registro de inundaciones de la St4 y St3 entre los meses de Abril a Septiembre de los años 2015, 2016 y 2017.....	28
Figura 4.4. Registro de inundaciones de la St4 y St3 entre los meses de Septiembre a Enero de los años 2016 y 2017.	29
Figura 4.5. Registros de inundaciones de la St3. Registros en diferentes meses de la St3 donde se observa un rápido flujo frente a un refluo gradual.	30
Figura 4.6. Aspecto de la planicie durante el invierno a) en la St3. b) en la St4. c) Registro de la inundación de la planicie en la St3 durante el invierno del año 2016. Se destaca el nivel de agua sobre la superficie durante varios días.....	31
Figura 4.7 a) Fragmento de mata microbiana sobre la vegetación luego de ser transportado por la corriente. b) Aspecto de la planicie de Paso Seco, donde se observan pequeños fragmentos de mata microbiana sobre la vegetación aledaña indicando el nivel de agua que alcanzó la inundación.....	31
Figura 4.8. a) Planicie de Paso Seco durante la época estival, con un aspecto seco sobre la planicie. b) Grietas de desecación donde se observa el sedimento infrayacente conservando la humedad. c) Registro de nivel de agua sobre la planicie durante la época estival. Se observa que el nivel de agua permanece por debajo de la planicie durante 20 días consecutivos. d) Depresiones en la planicie con cuerpos de agua en su interior. e) Se reconoce la reducción de la superficie ácuea por efectos de la	

evaporación. Se observan halos de nivel de agua superior alrededor de los charcos. f)	
Presencia de halita en las depresiones. g) Precipitado de yeso.....	32
Figura 4.9. Valores de salinidad medidos en la planicie de Paso Seco a través de las campañas realizadas.....	33
Figura 4.10. Valores de Eh del agua medidos en la planicie de Paso Seco.....	34
Figura 4.11. pH del agua medida en la planicie de Paso Seco a través de las campañas	34
Figura 4.12. a) Precipitación de cristales de halita en las depresiones sobre la planicie. b)	
Comportamiento del ión Ca^{2+} (en mEq/L) con respecto a la salinidad	35
Figura 4.13. a) Microfotografía del microscopio electrónico de barrido donde se observan la gran densidad de filamentos de cianobacterias. b) Perfil de la mata microbiana de Paso Seco. La capa superficial de color pardo está compuesta por diatomeas, por debajo se desarrolla una capa verdosa, donde se encuentran las cianobacterias. c)	
Fracción de un testigo de sedimento correspondiente a la St4. La imagen fue capturada minutos después de separar longitudinalmente el testigo. d) Testigo correspondiente a (c) luego de perder la humedad. e) Fracción de un testigo de sedimento correspondiente a la St3. La imagen fue capturada minutos después de separar longitudinalmente el testigo. f) Testigo correspondiente a (e) luego de perder la humedad. g) Testigo de sedimento con humedad y sin humedad. En la segunda se observa como el nivel arenoso se desmorona por falta de humedad.	37
Figura 4.14. Análisis granulométrico del sedimento fino (mata microbiana) utilizando el Mastersizer 2000. a) St4. b) St3. LG: limo grueso. AMF: arena muy fina. AF: arena fina. AM: arena media.	38
Figura 4.15. Análisis granulométrico mediante el método de tamiz de los niveles 2 y 3 correspondiente al sedimento de la St4.....	39
Figura 4.16. Análisis granulométrico mediante el método de tamiz de los niveles 2 y 3 correspondiente al sedimento de la St3.....	39
Figura 4.17. Ejemplo de testigo que se utilizó para el segundo método aplicado para medir granulometría. Las capas identificadas por a (arena) se analizaron por medio de tamizado y las capas identificadas por mm (matas microbianas) se analizaron por medio del Mastersizer.....	40
Figura 4.18. Diagrama ternario de caracterización granulométrica de los sedimentos según la clasificación de Folk (1954).	41

Figura 4.19. Análisis granulométrico de la capa de mata microbiana (mm de la Fig. 17) representado mediante un gráfico del Mastersizer 2000. LG: limo grueso; AMF: arena muy fina; AF: arena fina; AM: arena media.	41
Figura 4.20. a) Perfil de sedimento donde se observa con claridad la capa superficial de 1 mm de color parda clara seguido por debajo con un cambio de color brusco, consecuencia de la anoxia. b) Perfil de sedimento de Paso Seco recién cortada. En la capa superficial se observa una lámina de color pardo claro con burbujas producto de la fotosíntesis. Por debajo se observa una fina lámina de color verdoso donde se ubican las cianobacterias. Ambas forman parte de la capa óxica que se encuentra sobre la capa anóxica (de color negro). c) Testigo de sedimento de la St3 donde se observa la biolaminación producto de las matas microbianas. El testigo perdió humedad y con ella la parte anóxica se oxida y pierde la coloración oscura flecha: deformación de biolaminita d) Testigo de sedimento de la St4. Se observa la capa anóxica de hasta un 1 cm de espesor y por encima se observa una capa verdosa donde se encuentran las cianobacterias junto con diatomeas por arriba. La capa de arena de más de 5 cm de espesor muestra textura porosa. Las matas microbianas se presentan de coloración parda clara en laminaciones.	42
Figura 4.21. Similar temperatura superficial y subsuperficial del sedimento de la planicie en las diferentes campañas.	43
Figura 4.22. pH del sedimento superficial y subsuperficial de la planicie medidos en las diferentes campañas.	43
Figura 4.23. Eh del sedimento superficial y subsuperficial de la planicie medidos a través de las campañas.	43
Figura 4.24. Porcentaje de humedad de testigos de sedimento de acuerdo a los 3 niveles. Nivel I se encuentra en la superficie. Nivel II y III son consecutivos al nivel I en profundidad. Los espesores varían en cada nivel (ver Tabla 4.3).....	44
Figura 4.25. Porcentaje de humedad y materia orgánica de nivel I, II y III de St3 y St4.	45
Figura 4.26. Porcentaje de materia orgánica en el sedimento Las muestras analizadas fueron las mismas que se utilizaron para los cálculos de humedad.	46
Figura 4.27. Resultados del carbono total (CT), orgánico (CO) e inorgánico (CI) en muestras de diferente profundidad. Se compara el sedimento de St3 y St4.	46
Figura 4.28. Imágenes obtenidas a través de microscopio petrocalcográfico. a) Restos de conchillas de bivalvos, con nicoles paralelos. b) con nicoles cruzados. c) Foraminífero,	

con nicoles paralelos. d) con nicoles cruzados. e) Ostrácodo con nicoles paralelos. f) con nicoles cruzados. g) Restos de diatomeas con nicoles paralelos. h) restos de cianobacterias con nicoles paralelos. i) Granos de magnetita (flecha negra). j) Granos de pirita framboidal. k) coating o revestimientos de precipitado micrítico como también de composición férrica alrededor de diferentes granos. l) con nicoles cruzados.48

Figura 4.29. Imágenes realizadas a través de microscopio petrográfico. a) Imagen de corte delgado donde se observan niveles continuos de precipitado carbonático donde algunos niveles se encuentran atravesados por moldes de filamentos de cianobacterias, con nicoles cruzados. b) (a) con nicoles paralelos. c) Precipitado carbonático con formas redondeadas alargadas respetando un nivel determinado (flechas blancas). d) (c) con nicoles paralelos. e) Imagen donde se observa 2 secuencias de ~2 mm de espesor con los 4 niveles descritos en cada una, con nicoles cruzados. f). (e) con nicoles paralelos.....49

Figura 4.30. Imagen de las secuencias encontradas en los cortes delgados. a) Se observa la secuencia donde están señaladas la laminación 1, 2,3 y 4 con nicoles paralelos. b) (a) con nicoles cruzados. c) Imagen de la secuencia aumentada, donde aparece las Láminas 2, 3, 4 con nicoles paralelos. d) (c) con nicoles cruzados.....51

Figura 4.31. Análisis de Rayos X en roca total de sedimentos de la planicie. a) Ejemplo de la muestra extraída del testigo para el análisis de rayos X. b) Difractogramas donde se destaca la presencia de halita, yeso y calcita.....52

Figura 4.32. Micrografías realizadas con microscopio electrónico de barrido que permite observar la interacción entre sedimentos, precipitados y microorganismos en la planicie de marea. a) Filamentos de cianobacterias. b) Fragmento de diatomea junto con un filamento de cianobacteria. c) Filamentos de cianobacterias y la interacción con el sedimento. d) Fragmentos de microorganismos. Diatomea céntrica. e) Grieta en el sedimento donde intervienen numerosos filamentos de cianobacterias. f) Fragmentos de cianobacterias envolviendo grano de sedimento.....54

Figura 4.33. a) Micrografía (vista panorámica) que permite observar la biolaminación del sedimento de la planicie. b) Mapeo de la micrografía que se observa en (a) mostrando capas de calcio presente en el sedimento. c) Micrografía del sedimento donde se reconoce la presencia de calcio que se encuentra en forma de carbonato en capas de 100 a 200 um. d) Mapeo de la micrografía (c) donde se distinguen capas de composición cálcica y magnésica. e) Mapeo de la superficie en forma lineal

(Linescan). f) Imagen tomada con el microscopio petrográfico. Flecha: CaCO ₃ luego de la tinción.....	55
Figura 4.34. Fotografías de la planicie de Paso Seco. a-c) Fotografías de St3 donde se observan numerosas estructuras sedimentarias de deformación, mezcladas entre sí, sin un patrón determinado d-f) Fotografías de St4, la cual presenta una superficie mayormente plana.....	56
Figura 4.35. Fotografía donde se observa el desarrollo de grietas de desecación sobre la planicie. a) Planicie en época estival donde se observa la mata microbiana agrietada, con bordes irregulares la cual no llega a formar polígonos cerrados. b) Bordes de las grietas irregulares, donde el sedimento infrayacente conserva la humedad. c) Grietas de desecación que perdieron humedad. Se observa los bordes curvándose levemente hacia arriba.	57
Figura 4.36. Domo de mata microbiana. a) Mata microbiana de gran flexibilidad formando una estructura de domo, sin desgarros. b) Planicie de Paso Seco donde se desarrollan pequeñas estructuras en domos de diámetro menor a 5 cm. c) Domo microbiano durante una inundación, el cual se asoma sobre la superficie del agua. d) Domo microbiano sobre la planicie húmeda. e) Corte transversal de una estructura de domo. Se puede apreciar la cavidad que forma la mata microbiana al separarse del sedimento infrayacente. f) Corte transversal de domo microbiano. Se destaca la deformación del sedimento infrayacente, tomando la misma forma de la mata microbiana superficial.....	58
Figura 4.37. Fragmentos de mata microbiana. a) Fragmento presentando dobleces y pliegues. b) Se observa un pequeño fragmento (flecha). c) Fragmento de mata microbiana el cual fue roto durante su transporte y depositado en los bordes del área de estudio. d) Fragmentos de mata depositados en un mismo nivel sobre la vegetación indicando la altura que alcanzó el agua durante una inundación previa (flecha).	59
Figura 4.38. Estructura de superficie de desgarro. a) Dos superficies de desgarro (SD) las cuales en un extremo se encuentran asociadas a un enrollamiento (E) indicando la dirección que tuvo el desgarro. b) Superficie de desgarro asociada a estructura en doblez (D). c) Superficie de desgarro asociado a un pliegue de mata de mata microbiana (P).....	60
Figura 4.39. Dobleces de mata microbiana. a) Porción de mata superficial que se separa del sedimento infrayacente. b) Diferente coloración del sedimento subyacente. c) Estructura en doblez debajo de una Lámina de agua, donde se observa recolonización	

incipiente en las dos superficies generadas y expuestas por la estructura (flechas). d) Dobleces desarrollados en una dirección dominante coincidiendo con el reflujos (flecha). e) Estructuras en doblez asociados a bordes de desgarro. f) Dobleces de mata microbiana asociados a grietas de desecación.61

Figura 4.40. Remanente de mata microbiana y bolsillos de erosión. a) Bolsillo de erosión sobre la planicie de Paso Seco. La depresión se presenta con bordes agudos (flecha) y se observa desarrollo de ondulitas en el sedimento que ha quedado expuesto. b) Bolsillo de erosión (BE) con ondulitas en la superficie, donde los bordes de la depresión son graduales (flecha). El remanente de mata microbiana (R) se observa sin deformaciones. c) Bolsillo de erosión con recolonización incipiente.62

Figura 4.41. Pliegues de mata microbiana. a) Pliegue sobre sedimento saturado en agua. b) Conjunto de pliegues microbianos donde el plano axial de los pliegues se presentan casi paralelos. c) Pliegue con plano axial paralelo a la planicie (pliegue de mata microbiana recumbente). d) Pliegue microbiano (P) donde se observa la asociación con un desgarro (G) en la mata microbiana, la cual posibilita el desarrollo de la estructura plegada. Dobleces asociados al desgarro (D). e) Pliegue de mata microbiana, donde se observa la capa óxica y anóxica en la mata microbiana deformada (flecha). El sedimento infrayacente se encuentra deformado, tomando la forma de la mata microbiana superficial. El sedimento es de tamaño arena y recubierto por sedimento pelítico. f) Pliegue de mata superficial visto en planta. Se observa el sedimento infrayacente tomando la misma forma que la mata microbiana superficial deformada.64

Figura 4.42. Enrollamientos de mata microbiana. a) Asociado a una superficie de desgarro y a dobleces de mata microbiana (flecha). b) Vista de perfil de la estructura enrollada. Se observa el gran espesor (1 cm) de la mata microbiana enrollada. Se destaca sedimento infrayacente adosado a la superficie inferior de la mata microbiana (flecha roja). En los bordes de la estructura se puede apreciar la biolaminación característica del sedimento de la planicie (flecha blanca). c) Par de enrollamientos producidos por la misma superficie de desgarro. Se destaca la superficie de desgarro saturada en agua. d) Estructura de enrollamiento erosionada dejando expuesta una estructura compleja.65

Figura 4.43. a) Nivel y temperatura del agua registrada en la planicie de Paso Seco durante el mes de Junio de 2018, cinco días antes de la campaña. b) Imagen obtenida mediante el VANT donde se identifican estructuras de deformación. Superficies de desgarro (D),

enrollamientos de matas microbianas (E). Se muestra la dirección del evento erosivo (flecha) provocando transporte de sedimento (TP). c) Imagen obtenida mediante el VANT donde se observa enrollamientos de mata microbiana (E), pliegue de mata microbiana (P), Superficies de desgarró (D). d) Diagrama de rosas indicando la frecuencia y dirección de superficies de desgarró. Se señala la dirección del canal de San Blas (flecha roja) en coincidencia con la dirección del desgarró. e) Superficie de desgarró de mata microbiana asociadas a pliegues (flecha blanca) y dobleces de mata microbiana (flecha amarilla). Se observan bordes netos en el límite de la superficie de desgarró (flecha roja). f) Diagrama de rosas de 30 estructuras de enrollamiento de mata microbiana con respecto al norte magnético. Se indica la dirección del canal de marea (flecha roja). g) Enrollamiento microbiano asociado a fragmentos de mata microbiana (flecha negra). h) Bolsillos de erosión alargados generalmente ubicados en los bordes del canal. i) Imagen obtenida del VANT donde se observan estructuras de deformación direccionales coincidiendo con la dirección del flujo (flechas): enrollamientos de mata microbiana (E), pliegues de mata microbiana (P).....67

Figura 4.44. Recolonización. a) Biofilm de color pardo amarillento desarrollado en el fondo de una depresión en la planicie de Paso Seco. Se observa un enrejado y por debajo las cianobacterias de color verde. b) Biofilm gelatinoso removido (flecha) que atrapa gran cantidad de burbujas. c) Detalle del biofilm gelatinoso que cubre la superficie (b). d) Retículas desarrolladas en las depresiones sobre la planicie. e) Dobleces de mata microbiana donde se identifica la formación de retículas en los bordes de la estructura (flecha). f) Grietas de desecación rellenas por consecuencia de la recolonización. g) Testigo de sedimento formando biolaminitas. Se observan matas microbianas antiguas a 10 cm de profundidad.....68

Figura 5.1. Testigos de sedimento de la planicie de Paso Seco. Se observa la diferencia entre las dos estaciones en cuanto a la frecuencia de matas microbianas (Flecha verde: nivel de mata microbiana; flecha roja: nivel arenoso).....73

Figura 5.2. a) Planicie de Paso Seco donde se observa agua retenida en depresiones. b) El agua retenida empieza el proceso de evaporación. c) Mientras la evaporación en las depresiones avanza, la concentración de sales aumenta, se lleva a cabo la precipitación de minerales evaporíticos el cual se observa en los diferentes halos formados alrededor de la depresión (flechas). d) Evolución de la evaporación en la planicie (Lowenstein *et al.*, 2003). e) Registro del nivel de agua de Paso Seco durante el año 2016, se destaca como disminuye el nivel durante los meses estivales dejando expuesta la planicie...77

Figura 5.3. Fotografía extraída mediante el VANT de la planicie de Paso Seco. Se observa el curso del arroyo de marea cerca de la St3. Al fondo se aprecia el mar, separado del área de estudio por la espiga vegetada. A manera de escala se señalan personas sobre la planicie (círculos).....	78
Figura 5.4. a) Proceso de bioestabilización de las matas microbianas epibentónicas (extraído de Noffke, 2010). b) Fotografía de la planicie obtenida mediante el VANT donde se observan las pisadas de un animal (posiblemente jabalí) que desencadenaron el transporte de sedimento (color oscuro) por las corrientes de flujo.	80
Figura 5.5. Esquema de formación de matas microbianas desarrollado en 3 etapas. a) Etapa 1a: Colonización del sedimento por matas microbianas. Etapa 1b: Inundación de la planicie por tormentas moderadas. b) Etapa 2: Procesos físicos. El agua ingresa al área de estudio con gran energía y genera estructuras microbianas de deformación. c) Etapa 3: Proceso de licuefacción del sedimento infrayacente. Luego de permanecer inundada la zona por varios días, algunas estructuras de deformación son rellenadas por el sedimento infrayacente arenoso.....	84
Figura 5.6. a) Mata microbiana que incorporó rodados depositados en la superficie colonizada. b) Testigos de sedimento donde se observa la biolaminación.....	86
Figura 5.7. a) Pared erosionada en la planicie de Paso Seco donde se observa la biolaminación característica. Se destaca la mata microbiana superficial cubriendo parte del perfil sedimentario (flecha negra). Nivel de mata microbiana deformado en el perfil sedimentario (flecha blanca). b) Perfil de mata microbiana superficial deformada. c) Testigo sedimentario de la planicie de Paso seco donde se identifica la biolaminación. A los 10 cm de profundidad se observa un nivel de mata microbiana deformado, posiblemente un pliegue de mata microbiana (flecha blanca).....	87
Figura 5.8 a) Testigos de sedimento de Paso Seco. 1) con humedad. 2) Sin humedad. En el recuadro se destaca la ubicación de un corte delgado donde se encontraron láminas continuas de precipitado carbonático. b) Fotografía mediante la lupa estereoscópica, donde se observa material precipitado de color claro, junto con niveles de SPE (flecha amarilla). c) Microfotografía del corte delgado de figura (b) donde se observa L1, L2, L3 y L4. d) Posible mecanismo de formación del nivel de precipitado carbonático (detalles en el texto).	92
Figura 5.9. Esquema que relaciona la energía de la inundación (evento erosivo) y la generación de las estructuras de erosión y deformación.....	96
Figura 5.10. Dimensión de las estructuras de deformación y sus características.....	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Fechas de las campañas realizadas al área de estudio	15
Tabla 4.1. Máximas inundaciones que se registraron durante condiciones de tormenta cuando los vientos del SO superan los 40 km h ⁻¹	26
Tabla 4.2. Datos de salinidad de St4 y St3 de la planicie de Paso Seco.....	35
Tabla 4.3. Porcentaje de humedad de diferentes niveles en profundidad del sedimento de Paso Seco	45
Tabla 4.4 Porcentaje de Carbono total, orgánico e inorgánico de testigos de sedimento de St3 y St4.....	47

CAPITULO 1

1.INTRODUCCIÓN

1.1. Geobiología

La geobiología es una disciplina interdisciplinaria que utiliza las herramientas y principios de la biología para ser aplicados al estudio de la Tierra (Knoll *et al.*, 2012). Se basa en el estudio de la evolución de la Tierra en el presente y el pasado. Los geobiólogos se especializan en conocer de qué manera los microorganismos afectan a los sedimentos cambiando su respuesta a procesos físicos y geoquímicos. Su conocimiento es imprescindible para los geólogos al momento de interpretar paleoambientes, donde los sedimentos por sí solos no explican la presencia de determinadas estructuras. Es decir, la geobiología estudia la evolución conjunta de los procesos biológicos y los procesos geológicos superficiales, tal como se observa en la figura 1.1 (Cady y Noffke, 2009) donde se manifiesta que la biología y la geología no pueden responder algunas preguntas interdisciplinarias por sí mismas y necesitan de la interacción de ambas para explicar determinados procesos.

Los ecosistemas modernos, junto con información del paleoambiente y datos experimentales posibilitan al geobiólogo a formular hipótesis con carácter interdisciplinario. La geobiología se encarga de brindar herramientas para facilitar el trabajo del geólogo al momento de generar modelos encargados de reconstruir el paleoambiente, predecir posibles fluctuaciones a lo largo del tiempo y conocer la influencia biológica sobre los procesos físicos y químicos. El ambiente actual nos brinda herramientas valiosas ya que se pueden estudiar los diferentes procesos sedimentarios conociendo el aporte a dichos procesos de la actividad de los microorganismos. Luego, se podrá inferir las condiciones ambientales para reconstruir el paleoambiente de manera análoga.

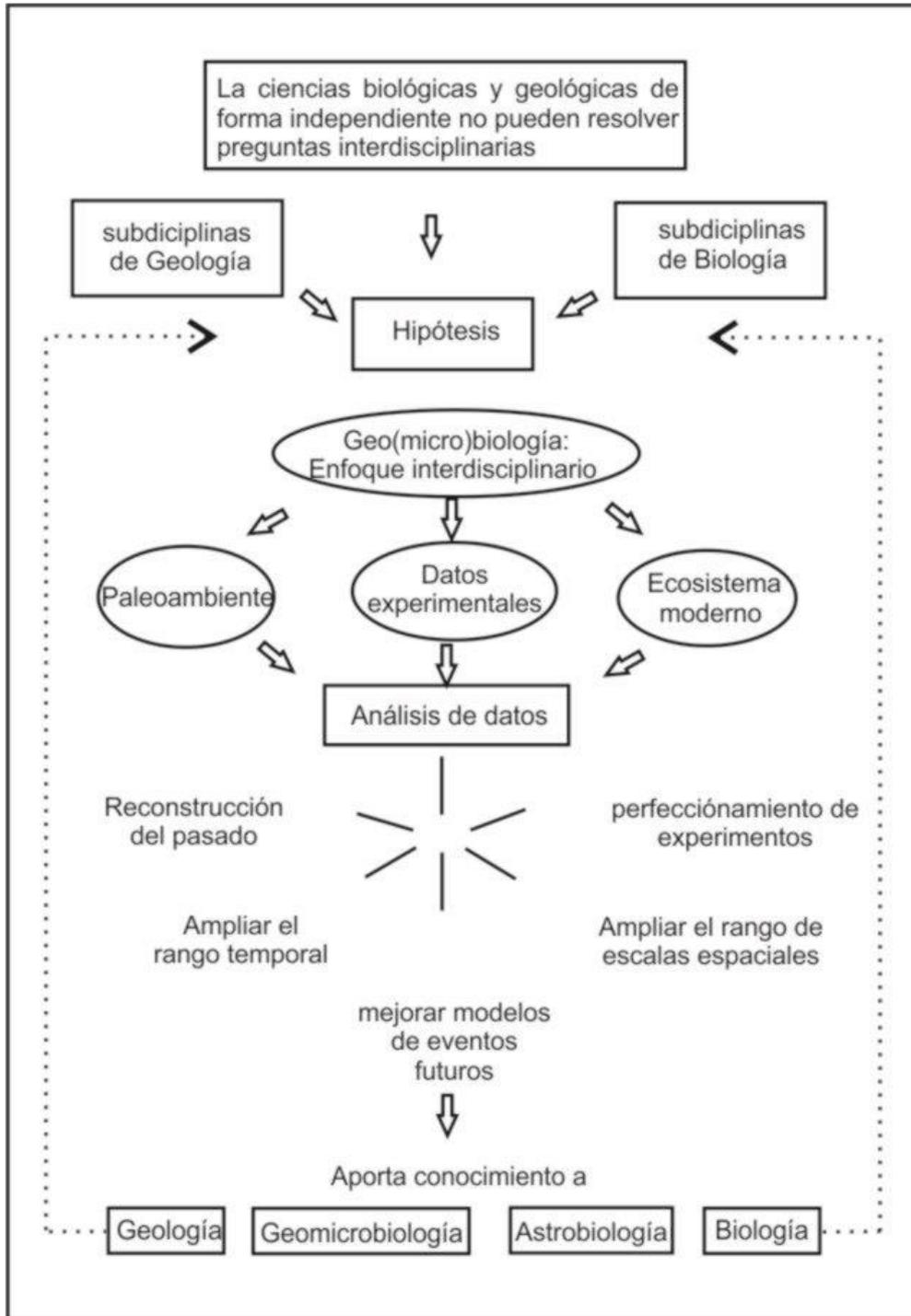


Figura 1.1. Esquema donde se ilustra el carácter interdisciplinario de la Geobiología (Modificado de Cady y Noffke, 2009). Traducción propia.

1.2. Matas microbianas

Desde hace un tiempo, la influencia de los microorganismos en los sedimentos marinos de plataforma carbonática, de zonas cálidas y latitudes bajas como es el caso

de los cayos de Exuma en Bahamas (Reid *et al.*, 1995), era reconocida simplemente como un proceso biogeoquímico que generaba estromatolitos, donde la estructura estaba compuesta por un conjunto de capas rígidas las cuales solo se podían observar a través de un corte transversal. Estas estructuras son consecuencia de precipitación in situ de minerales carbonáticos y “anóxicos” como ser pirita, siderita, dolomita férrica (Schieber, 1999; Gerdes *et al.*, 1985), la cual es inducida por el metabolismo de los propios microorganismos. Los estromatolitos, como los que se encuentran en los arrecifes en bajas latitudes, constituyen una unidad rocosa que puede ser preservada con facilidad; por ello se encuentran muchos ejemplos en el registro fósil y son una estructura producida por los primeros organismos con vida. Sin embargo, la actividad microbiana en el sedimento no siempre genera estromatolitos. En los ambientes silicoclásticos formados por material clástico, donde el cuarzo es el componente principal, el sedimento puede ser habitado por microorganismos bentónicos. Estos microorganismos forman “*biofilms*” que son finas cubiertas orgánicas alrededor de los granos, que pueden evolucionar generando capas de mayor espesor denominadas “matas microbianas”, las cuales pueden llegar a cubrir grandes superficies en numerosos ambientes sedimentarios. Tanto los *biofilms* como las matas microbianas poseen una sustancia adherente denominada sustancia polimérica extracelular (SPE), la cual es generada por los microorganismos presentes en el sedimento, brindando gran cohesión por el pegamento entre los granos (Noffke, 2010). Como resultado se genera una capa cohesiva capaz de comportarse como una alfombra o manta. Esto permitió reconocer la formación de diversos rasgos y estructuras sedimentarias inducidas por la actividad microbiana (ESIAM, Bournod *et al.*, 2014), conocidas como MISS (Microbially Induced Sedimentary Structures, Noffke *et al.*, 2001). Estas estructuras en el ambiente silicoclástico son los análogos de los estromatolitos en ambientes carbonáticos, y se encuentran en ambientes actuales como también en el registro fósil.

Entre las estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM), por un lado se encuentran las relacionadas directamente con el ciclo de vida de los microorganismos las cuales representan desde las etapas iniciales de crecimiento hasta los estadios finales de destrucción por diagénesis temprana. Generalmente se desarrollan en los momentos de calma, entre las que se encuentran biolaminación, domos, burbujas, entre otras (Schieber, 2004). Como ejemplo, las burbujas son el resultado de la fotosíntesis realizada por los microorganismos y pueden quedar preservadas como

estructuras microbianas en el sedimento. Por otro lado, se encuentran las ESIAM generadas como respuesta a un aumento de energía. Estas estructuras se forman debido a que los sedimentos colonizados por microbios indican fenómenos externos como la acción de olas y corrientes de modo diferente a los sedimentos sin colonizar (Noffke, 2010). El resultado de la interacción entre los procesos físicos y los sedimentos colonizados son la generación de estructuras de deformación como consecuencia de eventos erosivos, entre las que se encuentran los dobleces, enrollamientos, fragmentos, pliegues de mata microbiana (Noffke, 2010). Las diferencias entre las ESIAM serán desarrolladas a lo largo del trabajo.

1.3. Ambientes Silicoclásticos. Comparación con el ambiente carbonático

Las matas microbianas y su influencia en ambientes costeros carbonáticos están siendo estudiadas en detalle desde hace más de 20 años (Horodyski, 1983; Folk y Chafetz, 2000; Andres y Reid, 2006; Riding, 2006). Uno de los motivos por los cuales tomaron importancia fue porque en este tipo de ambiente las estructuras microbianas están bien preservadas (Chafetz y Buczynski, 1992; Reid *et al.*, 2000; Dupraz *et al.*, 2004). Según Bose y Chafetz (2011), el efecto de la diagénesis temprana en los ambientes mareales carbonáticos permite que las estructuras se preserven con facilidad. Estos trabajos argumentan que la principal diferencia de las estructuras de los ambientes carbonáticos vs. silicoclásticos es la rigidez que se desarrolla en el sedimento carbonático inducido por la cementación temprana. Este proceso incrementa la estabilidad, donde la erosión es menor en comparación con el ambiente silicoclástico. Por ello, el potencial de preservación en los ambientes carbonáticos es mayor. Según Bose y Chafetz (2011), en el ambiente carbonático el desarrollo de estructuras de deformación no son tan comunes como en el ambiente silicoclástico. Si bien, muchas estructuras se desarrollan en ambos ambientes, en el carbonático las matas superficiales tienden a ser más duras y de mayor espesor debido a la precipitación de minerales carbonáticos (Bose y Chafetz, 2011) y por ello no tienen la posibilidad de deformarse como en los ambientes clásticos. El ambiente silicoclástico junto con las estructuras sedimentarias que allí se desarrollan, tomaron relevancia en los últimos años (Cameron *et al.*, 1985; Gerdes *et al.*, 1993, 2000;

Noffke *et al.*, 2001a, 2001b). Varias investigaciones se llevaron a cabo, ya sea en registros fósiles (Schieber, 1998; Eriksson *et al.*, 2000; Prave, 2002; Pruss y Bottjer, 2004; Banerjee y Jeevankumar, 2005; Noffke *et al.*, 2006a, 2006b, 2008; Sarkar *et al.*, 2008; Noffke, 2010), como en modernos (Cameron *et al.*, 1985; Noffke, 1998; Noffke y Krumbein, 1999; Gerdes *et al.*, 2000; Noffke *et al.*, 2003; Schieber *et al.*, 2007; Bose y Chafetz, 2009).

1.4. *Biofilm* y matas microbianas

Tanto los *biofilms* (primer estadio de presencia de microorganismos sobre la superficie sedimentaria) como las matas microbianas (estadio más avanzado donde los microorganismos están verticalmente estratificados) son comunidades microbianas que colonizan el sedimento. Cuando estas comunidades se desarrollan se establece una íntima relación entre los microorganismos, la superficie colonizada y los procesos que se generan en el ambiente sedimentario. La composición orgánica de los *biofilms* puede variar ya que pueden estar compuesto por una especie o bien ser una comunidad compleja constituida por numerosas especies. Varios autores consideran a las matas microbianas como *biofilms* complejos (Noffke, 2010).

Las matas microbianas son comunidades de microorganismos bentónicos, verticalmente estratificadas, compuestas principalmente por cianobacterias, diatomeas, y otras bacterias (e.g. fototróficas anoxigénicas, sulforeductoras) (Stal *et al.*, 1985). Esta composición de microorganismos de diferentes grupos de la cadena trófica (productores, consumidores y descomponedores) genera que sea importante desde el punto de vista ecológico. Las cianobacterias son microorganismos filamentosos que crecen entre los granos de sedimento formando un denso entretejido en forma de red (Noffke, 2010). Tienen como característica principal que son fotoautótrofos y existen desde hace más de 2 Ga hasta la actualidad (Knoll *et al.*, 2012). Para su desarrollo se necesita la presencia de agua y luminosidad para que puedan realizar fotosíntesis. En un principio las cianobacterias debido a la gran longitud de los filamentos y por su color azulado verdoso se denominaron “algas azules”, dentro del grupo de las eucariotas representadas por los protistas como algas, hongos y plantas multicelulares. Más adelante, Stanier *et al.* (1977) descubrieron que estas cianobacterias eran de naturaleza procariotes, conformando el grupo de bacterias y archaea, las cuales son microorganismos que no presentan

un núcleo definido ni organelas celulares desarrolladas. Posiblemente ese fue el motivo por el cual se encuentran presentes desde los primeros tiempos de la Tierra. Por lo tanto, donde la antigua literatura se refiere a matas algales, el término correcto es el de mata microbiana (Noffke, 2010).

En general las matas microbianas desarrolladas en ambientes silicoclásticos se presentan en zonas restringidas, protegidas de grandes eventos de energía como olas o corrientes de marea. En los ambientes costeros supramareales, donde sólo es inundada en sicigia o durante tormentas, el tipo de mata microbiana que se desarrolla se denomina “matas microbianas epibentónicas”. Este tipo de matas microbianas se desarrollan en la superficie sedimentaria, generando gran cantidad de SPE (sustancias poliméricas extracelulares, conocida por sus siglas en inglés como EPS), como protección para la radiación solar que tienen que soportar durante varios días de exposición. Estas matas microbianas pueden presentar hasta 1.5 cm de espesor y el proceso por el cual crecen se denomina nivelación (*leveling* según Noffke, 1998; Noffke *et al.*, 2001b).

Una de las características fundamentales de los microorganismos formadores de matas microbianas (tanto cianobacterias como diátomeas) es que algunos secretan abundante cantidad de una sustancia mucilaginoso, SPE. Esta sustancia posibilita la locomoción de los microorganismos y también brinda protección frente a diferentes fenómenos externos. Ayuda a que las matas microbianas una vez formadas puedan tolerar alteraciones en las condiciones ambientales como ser cambios en la salinidad, temperatura, radiación UV, desecación, dando lugar a un mejor funcionamiento de sus actividades fisiológicas (Decho, 2000a). Al mismo tiempo, las SPE generan alta cohesión en el sedimento ya que forman una cubierta adherente en las partículas (Yallop *et al.*, 1994; Wetherbee *et al.*, 1998; de Winder *et al.*, 1999; Decho, 2000b). En ciertas ocasiones las SPE puede ser degradada por microorganismos heterótrofos como ser hongos, bacterias, arqueas, y con ello se liberan ciertos iones como Ca^{2+} los cuales contribuyen a la precipitación de CaCO_3 (Decho *et al.*, 2005).

La bioestabilización surge por la presencia de cianobacterias filamentosas y las SPE en el sedimento, que aumentan la cohesividad del mismo afectando las propiedades físicas. Ello modifica el umbral de erosión influyendo directamente en la respuesta de los sedimentos frente a los esfuerzos (Paterson, 1994). La interacción entre la actividad microbiana y la dinámica sedimentaria genera la formación de biolaminitas (Gerdes *et al.*, 2000), que es una sucesión de matas microbianas con intercalaciones de sedimentos clásticos.

1.5. Objetivo e Hipótesis

El reconocimiento de estructuras sedimentarias en la roca sedimentaria es un tema desafiante en el área de la sedimentología costera. Además, el estudio del potencial de preservación de las estructuras sedimentarias resulta importante al momento de realizar la interpretación paleoambiental en el registro geológico. El presente trabajo se desarrolla en un laboratorio natural que permite reconocer la presencia de matas microbianas colonizando los sedimentos superficiales. Estos microorganismos dan lugar a la formación de extensas alfombras microbianas de gran cohesión y flexibilidad que permiten el desarrollo de estructuras sedimentarias ya sean las generadas por actividad de los microorganismos en condiciones de baja energía o estructuras de erosión y deformación generadas como respuesta frente a procesos físicos como las corrientes de marea. Estas estructuras sólo se pueden formar considerando la participación de los microorganismos en interacción con los sedimentos.

El objetivo general del trabajo de tesis es reconocer estructuras sedimentarias de deformación inducidas por la presencia de microorganismos y determinar los procesos de generación, para su identificación en estructuras análogas en el registro fósil. Los estudios fueron temporales para determinar variaciones estacionales. De esta manera, a través de la identificación, el análisis y la interpretación de las estructuras sedimentarias en un sistema supramareal actual, será posible inferir ciertas características fundamentales para la comprensión e interpretación paleoambiental.

En el marco de los estudios desarrollados se pretendió testear las siguientes hipótesis:

- 1) *Bajo condiciones físicas y geoquímicas en un ambiente perimareal, que favorecen la colonización del sedimento por matas microbianas, se generan bioindicadores que se pueden encontrar en estructuras análogas fósiles. Se entiende como bioindicadores a cualquier elemento que proporcione marcas o pruebas científicas del pasado o del presente de la vida.*

- 2) *El ingreso de corrientes de marea en una morfología previa de canales mareales favorece el incremento de la velocidad de las corrientes y la formación de estructuras microbianas de deformación.*

CAPITULO 2

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se desarrolla en una planicie de marea siliciclástica colonizada por matas microbianas. La marea de la zona es clasificada según la frecuencia de las pleamares y las bajas como semidiurna, y según la magnitud como mesomareal (entre 2 y 4 m de amplitud). La amplitud máxima de marea que se desarrolla en la zona es de 2,57 m de acuerdo a la tabla de mareas (SHN). El área presenta un antiguo canal de marea, donde las mareas diarias no llegan a inundar la zona. Sin embargo, en ocasiones el canal es inundado por agua de mar varias veces durante el año. Por esa razón, el canal de Paso Seco se denomina planicie supramareal (Fig. 2.1).

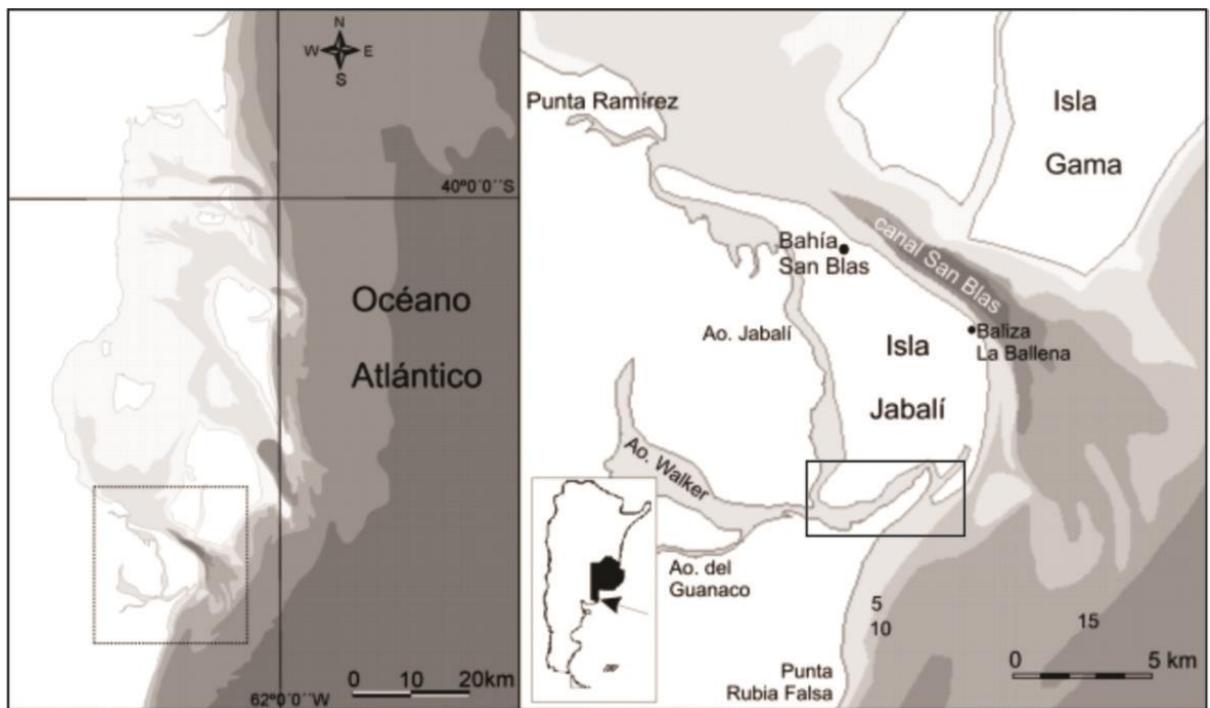


Figura 2.1. Mapa de localización de la zona de estudio Paso Seco (rectángulo). Modificado de Cuadrado y Gómez (2010).

2.1. Geología de los alrededores de San Blas

En la zona de San Blas puede distinguirse una cubierta sedimentaria cuaternaria sobre las areniscas de la Formación Belén (Kaaschieter, 1965) de edad terciaria. Está constituida por distintos depósitos marinos y continentales, identificables fundamentalmente por su morfología (Trebino, 1987).

La denominada isla Jabalí está limitada por un canal de marea que tiene su boca en el NO, desembocando en el canal San Blas. Witte (1916) expuso que la definición de isla es errónea y que consiste en una península, la cual está conectada con tierra firme en el SE, cuya zona se denomina Paso Seco. Este autor indica además, que se forma una verdadera isla cuando la zona de Paso Seco es inundada por agua de mar “cuando las mareas muy altas son acompañadas de fuertes vientos del sur”. Espinosa e Isla (2011) mencionan que la zona de Paso Seco tuvo una rápida evolución, ya que en cartas antiguas de 1833 aún existía un canal de marea en este sector, que se obstruyó completamente en 1912 según el mapa topográfico presentado por Witte (1916). En el lapso de 80 años el canal de marea se obturó por la formación de una espiga de arena en la costa (Espinosa e Isla, 2011).

La isla Jabalí está compuesta por depósitos de rodados y gravas de cordones holocenos, que en conjunto le confieren al paisaje una forma suavemente ondulada de origen marino (Witte, 2016; Trebino, 1987). Se pueden encontrar depósitos de salinas y salitrales, los cuales ocupan el fondo de las depresiones cerradas del piso llano. En los sectores más bajos suele localizarse la mayor concentración de sales, entre las que predomina el NaCl, CaSO₄ y sulfatos alcalinos. Intercalados entre los salitrales, se observan sedimentos clásticos tales como limo y arenas finas de colores que oscilan de un color castaño claro a un gris casi blanco. El origen de estos depósitos, según Bernasconi y Cangioli (1978) se vincula en parte a aguas subterráneas mineralizadas que ascienden por capilaridad, se evaporan y precipita la sal, como así también el agua de lluvia que al descender por las paredes de las depresiones incorporan las sales presentes y las depositan en los lugares más bajos, donde luego por evaporación cristaliza.

Las playas son de arena fina-media, moderadamente seleccionadas, de color amarillo claro pasando a castaño oscuro cuando aumenta el porcentaje de opacos. Los constituyentes principales son minerales livianos seguidos de minerales pesados, entre ellos magnetita subordinada (Frenguelli, 1950). Los médanos modernos se generan por

la acción directa del viento que retrabaja los depósitos psamíticos de playa. Estos depósitos se diferencian con las arenas de playa en que son menos competentes y más selectivos debido a la acción del agente eólico. Los diversos depósitos limo arcillosos de canales y planicies de marea se los reconoce en el canal de marea denominado arroyo del Jabalí. Están constituidos por sedimentos finos, limo arcilloso de color castaño grisáceo.

2.2. Geomorfología de la región de San Blas

De acuerdo a la geomorfología de la región de San Blas (Frenguelli, 1950), ésta se extiende en forma de baja meseta, de superficie casi llana a una altura de 35 a 50 msnm, interrumpida por cañadones erosivos y depresiones tectónicas cerradas, cuyo fondo, bajo el clima seco abriga salares y salitrales. Su suelo (como en el resto de la Patagonia extra andina) es arenoso y guijarroso y su vegetación es la de una rala estepa de arbustos y matas de pastos duros. La región de San Blas fue zona de paulatino hundimiento, hasta el final del Terciario y luego de levantamiento por empujes sucesivos durante el cuaternario (Frenguelli, 1950).

En San Blas, al igual que en el resto de la Patagonia, se presentan los “rodados patagónicos”, los cuales son depósitos de diferente edad, origen y procedencia (Frenguelli, 1950). Ocupan áreas determinadas y se encuentran separadas entre sí por amplios espacios desprovistos de rodados. En su mayor parte son depósitos de cauces fluviales extinguidos o sedimentos de terrazas a lo largo de los valles de los pocos ríos actualmente activos, y a lo largo de la costa del mar. Los rodados están compuestos principalmente por fragmentos de rocas volcánicas de diferentes edades (Frenguelli, 1950). A menudo, especialmente en los depósitos de escaso espesor y en la parte superior de los depósitos mayores, los rodados están revestidos por una capa de caliza terrosa, a veces delgada y otras de mayor espesor hasta llenar los intersticios transformando el depósito en un conglomerado fuertemente cementado. Esta caliza no es de origen sedimentario, sino que derivó del subsuelo por capilaridad, correspondiendo a un nivel desértico que se formó durante un largo período de sequías, antes de la acumulación de los sedimentos actuales (Frenguelli, 1950).

2.3. Geomorfología de la isla Jabalí

La geomorfología fue descrita por Witte (1916) y más recientemente por Trebino (1987). La altura promedio de la isla es de 6 m, siendo la máxima de 14 m en su extremo sudoccidental. Muestra tres paisajes diferentes, el sector occidental que corresponde a los bajos centrales y la planicie del arroyo del Jabalí; la zona central y noroccidental caracterizada por cordones litorales de variados diseños, en ciclos de depositación superpuestos con límites erosivos, y la zona costera del centro y sudeste con médanos de importante desarrollo, la mayoría de ellos vegetados.

En el sector centro sud se observan tres ciclos de depositación formados cada uno de ellos por varios cordones o barras de grava. En el margen sur, se observan, debajo de una importante cubierta de médanos, barras de grava similares a las antes descritas.

En el sector central de la isla Jabalí, se encuentran bien expuestas los extremos septentrionales de los ciclos de barras antes descritas y otros, de pequeña extensión, que muestran un moderado curvamiento de los cordones, siendo estos también truncados por los ciclos más jóvenes. En la zona hay canteras de grava de las cuales se ha extraído material para la construcción.

Los médanos costeros se encuentran dispuestos en una franja paralela a la costa con una extensión desde 300 m al norte del San Blas hasta el sur. El ancho de esta franja aumenta de 30 m en el N a 400 m al O de la Baliza “La Ballena”. Por otro lado, los médanos del extremo SO se desarrollan en el sector comprendido entre los arroyos del Jabalí y del Guanaco. No es clara la relación de éstos con los llamados médanos costeros (Teruggi *et al.*, 1957). Presentan plantas irregulares a estrellados, con caras de sotavento que miran hacia el S y SE. Al sur del arroyo del Guanaco se continúan las formaciones de médanos, hasta la Punta Rubia Falsa. Las características mineralógicas y granulométricas son similares para estos grupos de médanos, siendo remarcable, un mayor porcentaje de minerales pesados en el sector denominado costero (Teruggi *et al.*, 1957).

Trebino (1987) postuló que en la isla Jabalí se produjeron numerosas acumulaciones marinas (crestas y espigas de playa), las cuales suelen estar truncadas por erosión marina e interdigitadas. Están constituidas por rodados de rocas volcánicas (riolitas, andesitas y basaltos), y como constituyente secundario, formando a veces la matriz de un compacto conglomerado cementado por CaCO_3 se reconoce arena fina. El origen de

estos depósitos resulta de la removilización y depositación por acción marina de material clástico. Se le adjudica una edad Holocena sobre la base de dataciones de C^{14} , muy buen estado de conservación de los rasgos primarios, entre otros. En la isla se identificaron 10 unidades geomorfológicas, algunas de las cuales fueron datadas por el método C^{14} Trebino (1987). En cuanto al área de playa actual, desde el norte de la isla Jabalí hasta las proximidades de la baliza la Ballena se reconocen rodados extraídos de antiguos cordones litorales actualmente en proceso de erosión. A medida que aumenta la latitud, la playa se amplía. A partir del paralelo $40^{\circ}36'S$ la línea de costa muestra una marcada inflexión hacia el sur, variando consecuentemente su morfología litoral donde las playas de arena quedan con muy poca pendiente y gran extensión areal. Al sur de la isla Jabalí, se encuentra un área protegida de las olas, por una angosta faja de médanos costeros, las playas tienen un ancho promedio de 1000 metros. A lo largo de la misma se reconocen planicies arenosas ascendidas, poco vegetadas y alcanzadas sólo por las mareas de sicigia o tormentas (Fig. 2.2a).

2.4. Paso Seco

El área de estudio se desarrolló en Paso Seco ($40^{\circ}33'S$; $62^{\circ}13'O$), la zona que une la isla Jabalí con la parte continental (Witte, 1916; Fig. 2.2a). Es una planicie excepcional (Trebino, 1987) presentando un nivel supramareal, inundada episódicamente. Corresponde al fondo de un canal de marea antiguo que encuentra actualmente expuesto debido a la formación de una espiga costera con orientación NE-SO (Fig. 2.2c). El ingreso del agua de mar se realiza por un estrecho canal que corta la espiga de arena y comunica la planicie con el océano Atlántico (Fig. 2.2b, c). Por tales características, desde el punto de vista geomorfológico, el área es un ambiente progradante, por la formación de la espiga costera. Este antiguo canal de marea se desarrolla a lo largo de una franja de 2,7 km x 0,5 km con orientación aproximadamente NE-SO, la cual ocupa una superficie aproximada de 1,4 km² donde los sedimentos silicoclásticos se encuentran cubiertos por espesas matas microbianas con espesores mayores a 1 cm.

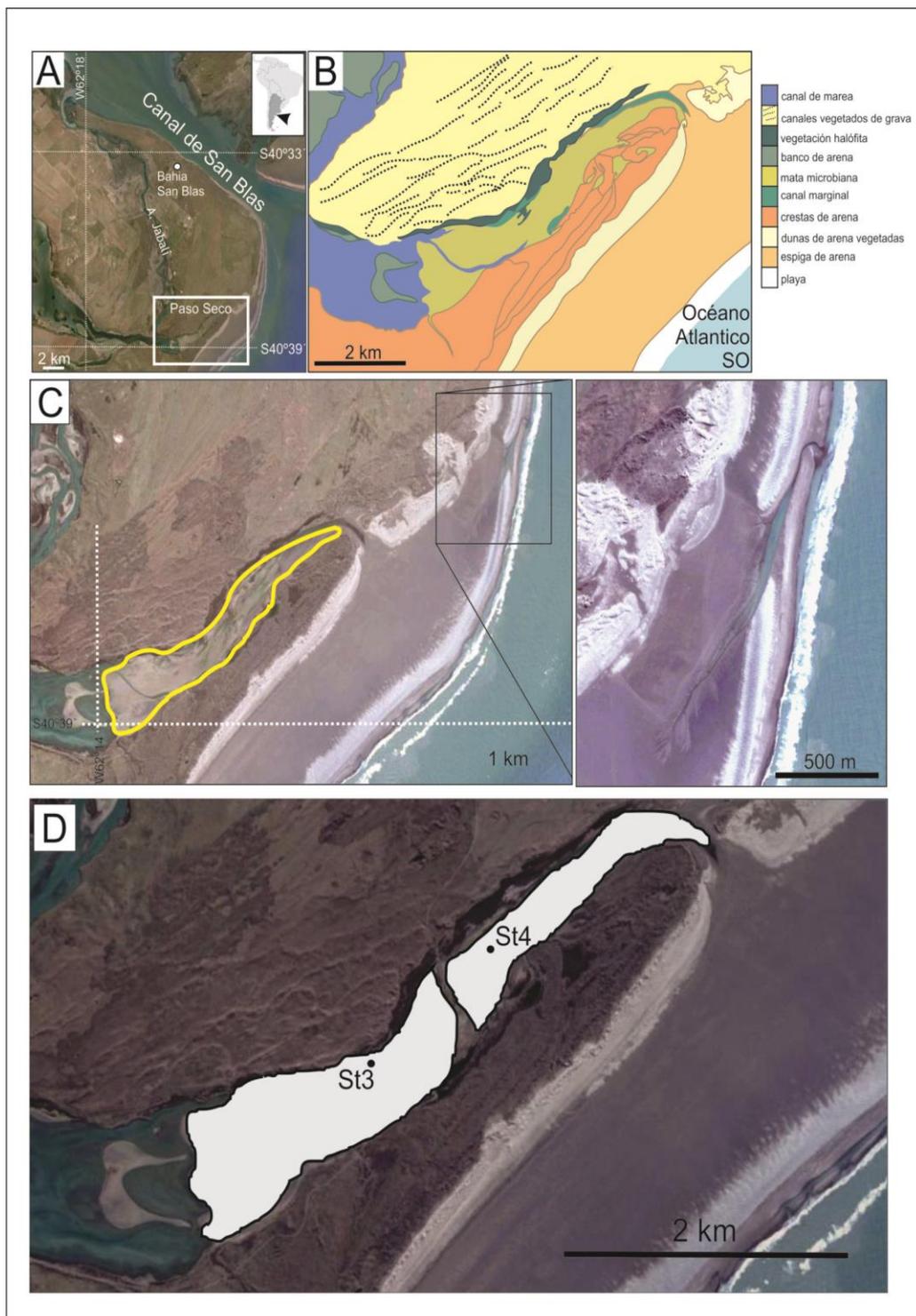


Figura 2.2. a) Mapa de ubicación del área de estudio dentro de la isla Jabalí. b) Mapa geomorfológico del área de estudio. c) Ubicación de área de estudio donde se discrimina la superficie estudiada. Se presenta un acercamiento de la zona por donde se produce el ingreso de agua al área de estudio d) Mapa del área estudiada donde se señala las estaciones de muestreo (St3 y St4). Modificado de Cuadrado *et al.* (2015).

El área se ubica a 1.8 km de la costa SO del océano Atlántico y está limitada en el borde norte por cordones de grava cubiertas de vegetación halófila, donde se ubican

depresiones inundadas de diferentes dimensiones (en términos de superficie y profundidad) (Fig. 2.2b). El agua en estas depresiones presenta una salinidad de ~ 25‰ y un pH de 8.8. El borde sur está limitado por cordones de arena vegetados y en el borde oeste la planicie está limitada por el canal de marea denominado arroyo Jabalí, por donde ingresa la marea diaria desde el canal San Blas ubicado al norte de la isla (Fig. 2.2a).

De acuerdo a la clasificación climática de Argentina, Paso Seco está ubicado dentro de la subdivisión denominada meseta templada semiárida (Tonni *et al.*, 1999). Esta zona tiene un promedio anual menor a 300 mm de precipitaciones y una evapotranspiración que generalmente supera a las precipitaciones (Ferrelli *et al.*, 2012). A pesar de la latitud media y temperatura moderada, el área de estudio tiene una aridez suficiente para limitar el desarrollo de la vegetación dando lugar al desarrollo de un ambiente salino (Clapperton, 1993) similares a los del norte de África, península arábiga y oeste de Asia (Yechieli y Wood, 2002).

CAPITULO 3

3. METODOLOGIA

3.1. Diseño de muestreo

Se realizaron campañas durante 3 años consecutivos: 2015-2016-2017 (Tabla 3.1) con el propósito de identificar las diferentes estructuras microbianas que se encuentran en el sector estudiado. Se realizaron campañas en diferentes estaciones del año para estudiar sus características y diferencias.

Tabla 3.1. Fechas de las campañas realizadas al área de estudio

Año 2015	Año 2016	Año 2017
19/05	23/03	13/03
13/07	07/07	23/05
06/10	22/11	20/09
11/12		10/10

Se establecieron dos estaciones a lo largo de la planicie estudiada, en función de la distancia al mar (Fig. 2.2d). Se identificaron como estación 4 (St4: 40°38'16.2"S-62°12'33.2"O) la ubicada a 3 km del mar. La estación 3 (St3: 40°38'41.3"S-62°12'59.2"O) es la más alejada del mar, a 4 km, que además se encuentra cerca del extremo final de un arroyo de marea cuyo ancho es < 2 m (según la clasificación de Perillo, 2009) que cruza la planicie bajo estudio, constituyendo el extremo final del canal de marea denominado arroyo Jabalí (Fig. 2.2a). En cada estación se realizó una perforación en la planicie donde se colocó un sensor para medir el nivel de agua que se detallará en la siguiente sección. Al mismo tiempo, en las dos estaciones se realizaron las siguientes actividades:

- Mediciones in situ de pH, Eh, temperatura y conductividad del agua;
- Mediciones de pH, Eh y temperatura del sedimento;
- Se recolectaron muestras de sedimento para su estudio en laboratorio;

- Se documentaron mediante cámara fotográfica de 16 MB las características de las matas microbianas como también las estructuras sedimentarias para identificar características generales, morfología y orientaciones de las mismas con respecto al canal. También se documentó en cada campaña la planicie en diferentes estaciones del año.
- Se documentaron mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT) las características del canal de marea de Paso Seco.

3.1.1. Medición del nivel de agua.

Para detectar las fluctuaciones del nivel del agua por debajo de la superficie y las inundaciones del agua de mar se instaló un sensor de presión HOBO (U20-001-02-Ti) marca ONSET a 0,4 m por debajo del nivel de la planicie (Fig. 3.1) dentro de un tubo de PVC protegido por debajo con una tela porosa. El tubo se encuentra ranurado en toda su extensión para permitir el ingreso del agua intersticial. Se programó para grabar los datos de nivel de agua y la temperatura del agua cada 10 minutos y los datos se fueron recopilando durante las campañas de campo, como máximo cada 4 o 5 meses. Los datos se corrigieron por presión atmosférica, para lo cual se colocó otro sensor en un nivel superior a la planicie, cerca del camino. Se obtuvieron diversos gráficos que permitieron

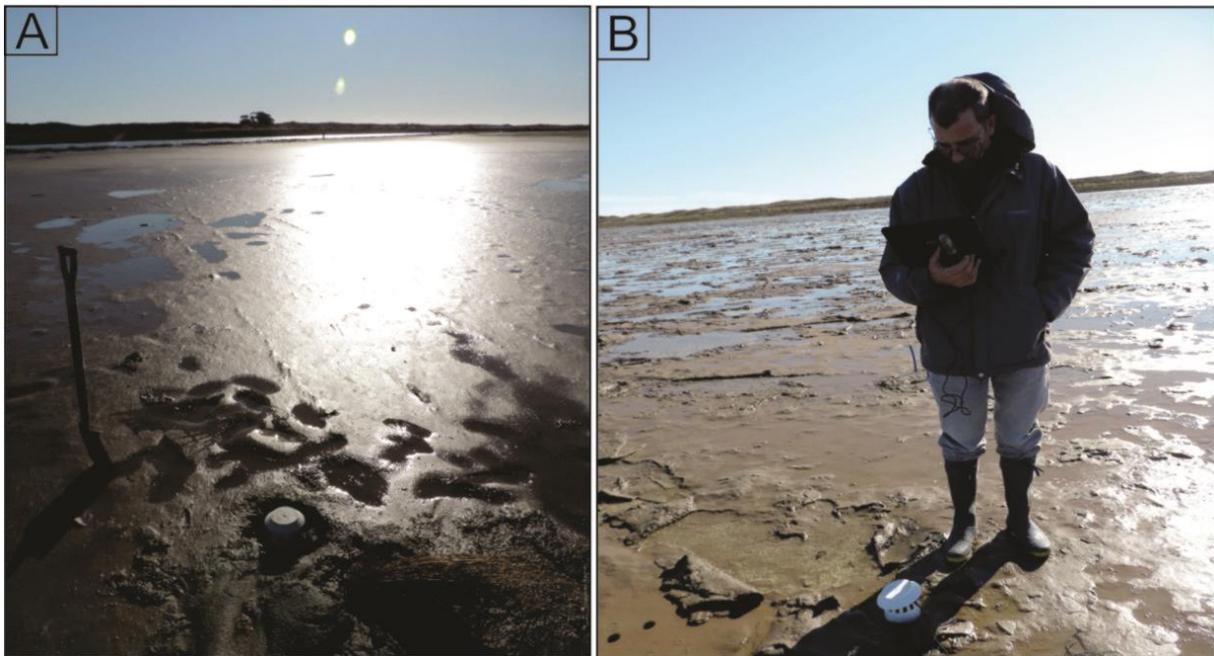


Figura 3.1. a) Localización del sensor de agua en la planicie de Paso Seco. b) Recolección de datos.

observar las variaciones del nivel de agua y la temperatura durante el período documentado en cada estación.

3.1.2. Medición de salinidad del agua.

Durante cada campaña se realizaron mediciones de conductividad del agua en los mismos pozos donde se colocó el HOBO con un conductivímetro HANNA HI9033, que registra valores de alta conductividad desde 0,0 a 200 mS/cm. Estos valores se multiplicaron por una constante (conductividad en mS*0,638) para transformarlo a salinidad. Durante la campaña del 20 de setiembre de 2017 se tomaron muestras de agua de los tubos que contienen los sensores, en St3 y St4, en dos depresiones cercanas a la St4 que mantenían el agua de la inundación previa (4 días antes), y en el arroyo de marea cercano a la St3. Se determinó la salinidad y el ión Ca^{2+} en mEq/L.

3.1.3. Mediciones de pH, Eh y Temperatura en agua y sedimentos.

Se midieron el pH, Eh y temperatura en el agua donde se encuentra ubicado el HOBO, con el phmetro HANNA HI991003. Simultáneamente, se midió este parámetro en el agua intersticial.

En las dos estaciones de muestreo se midieron los mismos parámetros de pH, Eh y temperatura del sedimento. Las mediciones se realizaron por duplicado. Primero se colocó el instrumento sobre la superficie para medir las condiciones del sedimento superficial. Luego se sacó la primera capa superficial para visualizar la capa anóxica de color negro y se realizó una nueva medición (sedimento subsuperficial). Generalmente la capa anóxica se desarrolla 0,5 cm por debajo de la superficie. Luego se tomó una réplica de los datos.

Por otro lado, se tomaron testigos de sedimento (por duplicado) con tubos de 3 cm de diámetro y 7 cm de largo para diferentes análisis en el laboratorio. En cada estación se extrajeron:

- Dos testigos para hacer análisis de humedad y materia orgánica
- Un testigo para calcular tamaño de sedimento
- 1 testigo para realizar cortes delgados

- 1 testigo para observar la muestra a grano suelto en lupa y extraer muestras para Rayos X
- Muestra de sedimento para analizar con microscopio electrónico de barrido (MEB).

3.2. Actividades de laboratorio y gabinete

3.2.1. Estudios hidro-sedimentológicos.

Se graficaron las fluctuaciones del nivel de agua, identificando las inundaciones durante el año, lo que permitió además hacer una comparación entre las estaciones de muestreo. Se posee un registro completo ininterrumpido durante los 3 años en la St3 (a 4 km del mar), mientras que para la St4 que se encuentra más cercana al mar (3 km) se posee un registro que abarca desde abril hasta noviembre del 2015 y otro registro desde marzo 2016 hasta octubre 2017.

Los registros del nivel del agua se analizaron junto con las características meteorológicas por medio del modelo numérico Global Forecast System (GFS) extraído del servicio de WindGuru. Se utilizaron los datos de velocidad y dirección de viento en los días cercanos a las inundaciones registradas. Por medio del mismo servicio se obtuvieron los valores del modelo NWW3 (NOAA wave watch III) para conocer los datos de ola, altura significativa, periodo y dirección de oleaje. Si bien los datos que utiliza este modelo son datos calculados para mar abierto, se consideran sólo como aproximación de los valores costeros, ya que se carece de toda información oceanográfica de estaciones cercanas.

3.2.2. Estudios sedimentológicos.

Las muestras de sedimento fueron analizadas para determinar la granulometría, porcentaje de humedad, porcentaje de materia orgánica. Se realizaron secciones para observar grano suelto, secciones para realizar cortes delgados, fracción de sedimento para Rayos X, para Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) y Sistema de Microanálisis de Rayos X por Energía Dispersiva (MEB- EDAX).

3.2.3. Determinación de tamaño de sedimento.

Se desarrollaron dos metodologías a lo largo de la tesis para calcular el tamaño de sedimento. El primer método se realizó durante la primera etapa de la tesis y consistió en separar el testigo teniendo en cuenta los parámetros de profundidad y el espesor. Se determinaron tres secciones: la primera capa representada por la superficial donde se encuentra la mata microbiana activa (entre 0,5 y 1 cm), la segunda y tercer capa se hicieron consecutivas a la primera de 2 cm de espesor cada nivel. Generalmente, la capa superficial en los testigos tiende a separarse del resto del testigo en la base debido a la mata activa, caracterizada por sedimentos finos. Esta capa fue analizada con el analizador de partículas Malvern Mastersizer 2000, utilizando el método de difracción laser. El resto del testigo que contenía mayor porcentaje de sedimento grueso (arena) fue analizado con tamizadora sónica con espesores entre 1,5 a 3 cm para obtener los porcentajes de arena muy fina, fina y media de cada nivel, y el porcentaje de material pelítico (arcilla y limo) por diferencia.

Para analizar las muestras de sedimento fino, el primer paso fue tratarlas con peróxido de hidrógeno para eliminar la materia orgánica (MO) presente. Para ello, se dejaron las muestras reaccionar a temperatura ambiente con HCl al 10 %, y luego para eliminar los restos de MO se colocaron en planchas a ~ 40° C hasta la digestión completa de materia orgánica (se detiene la reacción). Para que la muestra sea representativa se agrega agua destilada hasta conseguir una consistencia cremosa.

De acuerdo a los resultados obtenidos se decidió realizar un segundo método, que se desarrolló en la segunda etapa de la tesis. Consistió en seleccionar dentro del testigo capas de sedimento de acuerdo a parámetros texturales y de color, donde los espesores son variables. El tamaño del sedimento se obtuvo por medio de dos métodos diferentes. Las capas que contenían sólo material fino se analizó con el analizador de partículas Malvern Mastersizer 2000, y para las muestras que contenían arena se utilizó la tamizadora sónica. Luego de hacer las mediciones, los datos se incorporaron al Gradistat, V 4.0 (Blott y Pye, 2001), con el que se determinaron los parámetros estadísticos usando la metodología de Folk y Ward (1957). La clasificación de las muestras se obtuvo a partir de su distribución en el diagrama de Folk (1954).

3.2.4. Determinación de humedad.

Para el análisis de humedad del sedimento se utilizó un testigo, el cual se seccionó en 3 partes de acuerdo al color/textura, de manera similar a las determinadas para granulometría. Cada sección se analizó con el método tradicional de determinación de la humedad en laboratorio, a través del secado a estufa a 60 °C hasta peso constante, donde la humedad es:

$$w = [(W_f - W_i) / W_i] * 100 (\%)$$

donde :

w = contenido de humedad expresado en %

W_i = peso de la masa de suelo con humedad

W_f = peso de la masa de suelo sin humedad

3.2.5. Determinación de materia orgánica.

Luego de la determinación de la humedad en las muestras, éstas se utilizaron para el cálculo del contenido de materia orgánica (%), a través de la pérdida de peso por ignición (LOI), donde se realiza el calcinado de las muestras previamente secas a 450±50 °C durante 4 horas en un horno de mufla (Dean, 1974; Buhl-Mortensen, 1996). Se calcula el porcentaje de materia orgánica mediante el siguiente cálculo:

$$w = [(W_i - W_f) / W_i] * 100 (\%)$$

donde :

w = contenido de materia orgánica expresado en %

W_i = peso de la masa de suelo sin humedad con carbono orgánico

W_f = peso de la masa de suelo sin carbono orgánico

3.2.6. Determinación de microorganismos en el sedimento con otros métodos

Se analizaron muestras de sedimento colonizadas por microorganismos por medio de lupa estereoscópica Nikon SMZ 1500, para determinar las características de las matas microbianas, las SPE y granos de sedimentos. Se extrajeron sub-muestras del testigo para realizar difracción de Rayos X y observar a través del microscopio electrónico

de barrido (SEM) y por el sistema de microanálisis de Rayos X por Energía Dispersiva (SEM- EDAX). Para las muestras de Rayos X se utilizó el método de polvo, que se extrajo de finas capas de sedimento. La selección de la muestra se realizó teniendo en cuenta parámetros de textura y color identificando las matas microbianas como láminas de sedimento fino dentro de las biolaminitas. Las muestras fueron procesadas en la cátedra de Geoquímica perteneciente al Departamento de Geología de la Universidad Nacional del Sur. El difractómetro utilizado fue Rigaku D-Max III-C con radiación de Cu $K\alpha$ y monocromador de grafito, con 35 Kv y 15 mA.

Para los análisis con SEM y SEM- EDAX se extrajeron muestras de sedimentos en pequeños bloques de $\sim 0,5 \text{ cm}^3$ de la planicie, para observar la relación entre los microorganismos, sedimentos y SPE. Inmediatamente de su recolección se fijaron con glutaraldehído 2,5 % en buffer fosfato 0.067 M (pH 7.2) para congelar la actividad microbiana. Luego, las muestras fueron procesadas en el servicio de Microscopía Electrónica del CCT Bahía Blanca. Se realizaron 3 lavados con el mismo buffer empleado para la fijación (10 minutos cada uno) y se continuó con una deshidratación en gradiente de acetona (25, 50, 75 y 100 %). Finalmente se realizó el secado por punto crítico de las muestras para eliminar la humedad (secador Polaron E3000), se montaron sobre tacos, y se les depositó Au empleando una evaporadora de metales en plasma de Argón (Pelco model3). Para el estudio se empleó un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) marca LEO, modelo EVO 40 XVP (2004), acoplado a un sistema EDS marca Oxford, modelo X-Max 50 (2017). Tanto la observación como la identificación elemental se realizaron a un voltaje de aceleración de 20 kV y según las condiciones de calibración establecidas por el sistema de microanálisis. Para la observación de los sedimentos y detección zonal de elementos se realizaron mapeos de las superficies.

3.2.7. Confección de cortes delgados

De los testigos se confeccionaron cortes delgados petrográficos para estudiar la fábrica sedimentaria. Las mismas se elaboraron en el Laboratorio de Petrotomía de la Universidad Nacional del Sur donde el procedimiento para realizarlos fue particular, ya que al trabajar sedimento suelto la muestra puede romperse fácilmente evitando apreciar las estructuras internas y posibles precipitados en el sedimento, parámetros que son importantes al momento de estudiar los procesos que se desarrollaron en cada nivel. Por

ello, el testigo fue tratado con cuidado ya que a medida que la humedad se pierde, la muestra se vuelve frágil.

Para realizar los cortes, en primer lugar se dividió longitudinalmente el testigo en dos mitades y se dejó secar a temperatura ambiente hasta perder la humedad. Para la elección del sector se identificó la presencia de mata microbiana en el testigo sedimentario. La muestra se impregnó con una solución de resina a temperatura constante de 45 °C en plancha. La solución consiste en resina epoxi DICAST 867 a la que se le agrega endurecedor (ayuda a acelerar el proceso) en una relación 4:1 (resina: endurecedor). Para este tipo de muestras al ser más delicadas y propensas a desgranarse, se utiliza el endurecedor (acelerador) DISCURE 383, el cual al presentar menor viscosidad permite que la resina penetre de manera adecuada en el sedimento dando como resultado una muestra más resistente y homogénea. Luego que la solución impregna la muestra, se procede al secado en una plancha a 60/70 °C por 24 horas. Una vez consolidada la muestra por la impregnación, se procede a formar los tacos (Fig. 3.2).

Luego, se pulen los tacos en los discos de alta y baja revolución con carburos de silicio de diferentes granulometrías. Se termina el proceso con el pulido sobre vidrios con abrasivos más finos hasta llegar a la superficie plana que se pegará en el vidrio. El pegado se hace con una solución de las resina epoxi DICAST LY 554 y endurecedor DISCURE 554 en una proporción 1:5. Las temperaturas y tiempos para formar la solución y luego el pegado de la muestra al vidrio coincide con la de impregnación. Con respecto al espesor del corte delgado para su estudio, se dejaron las láminas con mayor espesor que el establecido para hacer petrografía tradicional en rocas (30 µm), ya que al llevar el sedimento colonizado hasta el espesor tradicional se corre el riesgo de perder fragmentos de la misma.

Se determinó la naturaleza del carbonato por medio del método de tinción de carbonatos. Para este método se utilizó una solución de Ferrocianuro de Potasio $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$, Alizarina y Ácido Clorhídrico con el objetivo de teñir el precipitado. Luego, de acuerdo al color que adopta el carbonato se puede inferir su composición determinando si se está en presencia de calcita. Para la preparación se mezcló 0,5 gr. de Ferrocianuro de Potasio $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ y 0,2 gr. de alizarina en 50 ml de agua destilada. Se mezclan las soluciones hasta disolverse. Luego se le agregan dos gotas de ácido clorhídrico (HCl) y se deja agitándose durante 10 a 20 minutos. Para realizar el teñido, se introduce la muestra (sólo la mitad de la muestra) en un envase de solución por espacio de un minuto y se

enjuaga con agua destilada. Se debe tener la precaución de realizar el teñido en sentido contrario a la estratificación de la muestra. Se deja secar para colocarle el cubre objeto.



Figura 3.2. Procedimiento de ejecución de cortes delgados. a) El testigo fue dividido en dos partes, de forma longitudinal. b) Se dejó secar por varios días hasta perder la humedad. c) Colocación de la resina. d) Luego de impregnar la muestra se la coloca sobre una plancha por 24 horas. e) Se identifican segmentos del testigo para la formación de los tacos. f) Tacos sobre los que se realizaran los cortes delgados.

CAPITULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Hidrodinámica

4.1.1. Características de las inundaciones

Se analizó el ingreso del agua de mar y las variaciones del nivel freático desde marzo de 2015 hasta marzo de 2018 mediante gráficos donde se observan los cambios de nivel de agua y temperatura durante los tres años documentados. Con respecto a la temperatura del agua, los valores disminuyen hasta 5°C durante el invierno, y pueden alcanzar 26°C en los meses de verano (Fig. 4.1a, b). El registro del nivel del agua presentó un promedio de 43 inundaciones al año de la planicie considerando el sensor de la St3, el cual contiene los tres años completos de mediciones.

Las inundaciones en la planicie ocurren cuando el agua del mar supera la espiga costera en determinadas circunstancias. Las máximas inundaciones se registraron durante condiciones de tormenta cuando los vientos del SO superan los 40 km h⁻¹ (Tabla 4.1). Estas condiciones meteorológicas generan un aumento en la altura de las olas, que sobrepasan la espiga, más aún en condiciones de sicigia. Sin embargo, las condiciones meteorológicas son las que prevalecen para el ingreso del agua al sector de estudio. A modo de ejemplo se graficaron sucesivas inundaciones registradas en junio de 2015 y se observa que éstas ocurren cuando las alturas pronosticadas de olas fueron superiores a 2 m (datos obtenidos de archivos de WindGuru). Se aprecia que existe una completa correlación entre estas dos variables, en coincidencia con pleamar, aún fuera de las condiciones de sicigia (Fig. 4.1c).

Sin embargo, las dos estaciones de muestreo, St3 y St4, no reciben la misma frecuencia de inundaciones. La St3 presenta mayor número de inundaciones que la St4. Las inundaciones que sólo ocurren en St3 se relacionan con vientos fuertes del

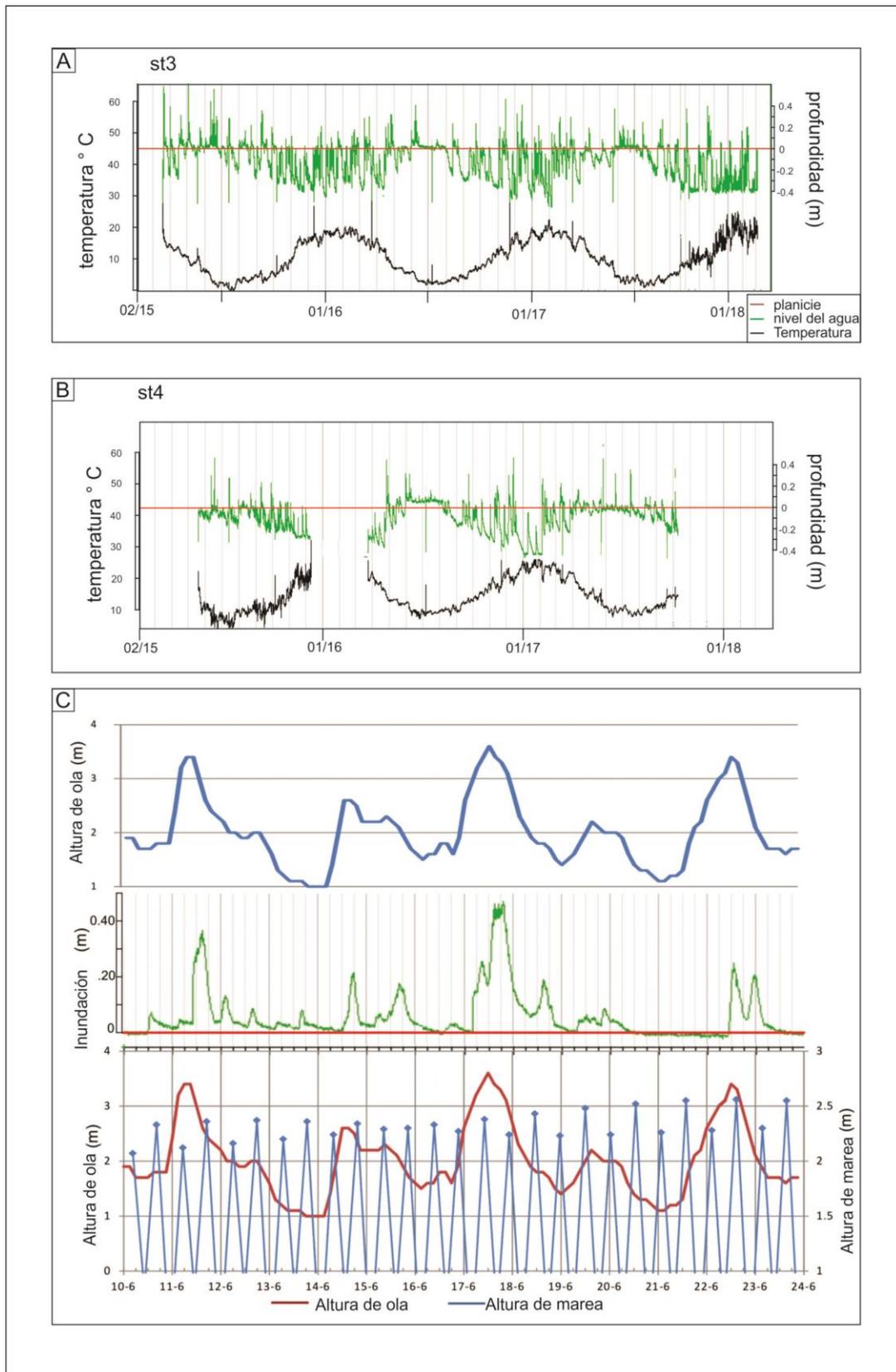


Figura 4.1. Registro de inundaciones medidas con el sensor HOBO. a). Inundaciones en la planicie en la St3. b) Inundaciones de la planicie en la St4. c). Relación entre la altura de ola, inundaciones registradas en junio de 2015, y pleamar pronosticada.

Tabla 4.1. Máximas inundaciones que se registraron durante condiciones de tormenta cuando los vientos del SO superan los 40 km h⁻¹.

DIA	INUNDACION (m)	VEL. VIENTO (km/h)	DIREC.V
11/6/2015	0.3	50	SO
17/6/2015	0.45	50	SO
14/7/2015	0.25	43	SO
22/8/2015	0.15	51	SO
10/9/2015	0.25	58	SO
28/9/2015	0.25	58	SO
25/4/2016	0.45	55	SO
31/5/2016	0.3	53	SE
7/6/2016	0.4	55	SO
22/9/2016	0.25	54	SO
10/11/2016	0.45	50	SO
5/12/2016	0.3	55	S-SO
12/12/2016	0.4	62	S-SO
4/2/2017	0.15	52	SE
10/3/2017	0.3	55	SO
11/4/2017	0.2	48	SO
18/6/2017	0.2	89	SO
15/7/2017	0.2	56	S-SO

NO que fuerzan el ingreso del agua por el canal denominado arroyo Jabalí y finaliza en el arroyo de marea que atraviesa parte de la planicie, cerca de la St.3 (Fig. 2.1b). En estas condiciones la St4 no registra inundación de la planicie (p.e. el día 17 de Abril de 2015).

Con respecto a la variación anual, el nivel de agua presenta comportamientos diferentes. Durante los meses de invierno el nivel del agua permaneció sobre o cerca de la superficie manteniendo la planicie inundada durante varios días, favorecido por

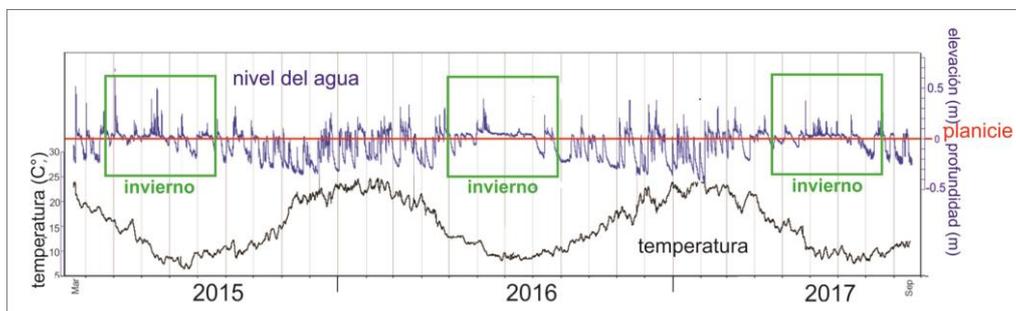


Fig. 4.2. Diferencias en el nivel del agua entre invierno y verano.

la baja radiación solar (Fig. 4.2). En el invierno la planicie permaneció inundada por 28, 63 y 52 días durante 2015, 2016 y 2017 respectivamente. Las máximas inundaciones en el periodo analizado alcanzaron los 0,55 m sobre la planicie en Mayo de 2015. Contrariamente, durante los meses cálidos, el nivel de agua puede descender hasta los 0,50 m por debajo de la planicie y en algunos casos se mantiene durante varios días consecutivos (Fig. 4.2, 4.3). Durante el verano la planicie quedó expuesta un máximo de 48, 43 y 37 días en 2015, 2016 y 2017 respectivamente (Fig. 4.4). En numerosas ocasiones el nivel de agua por debajo de la planicie sufre elevaciones, aunque no alcanza a superar la superficie de la planicie, manteniéndose por varias horas pocos cm por debajo de la misma.

El análisis de los registros permite establecer el desarrollo de un patrón de inundación sobre la planicie que se repite en cada una de ellas, en el cual el flujo se desarrolla de forma rápida, alcanzando el máximo de columna de agua sobre la planicie en pocas horas, frente a un reflujó gradual donde el agua toma más tiempo en retirarse. Se destaca la asimetría entre los dos procesos (Fig. 4.5a-d), que se puede expresar en la relación entre la altura de la columna de agua y el tiempo que tarda en alcanzar dicha altura (H/t), la cual es proporcional a la velocidad de la corriente de agua. Esta relación H/t siempre es mayor para el ingreso del agua que para el desagüe, indicando que la velocidad del flujo es siempre mayor que la velocidad del reflujó por consecuencia la energía a la que está expuesta la planicie durante el flujo es mayor en comparación con la energía generada por el reflujó. Por un lado, el flujo al ingresar a la planicie presenta un promedio de $H/t=0.14 \text{ m h}^{-1}$ mientras que el reflujó o drenaje se desarrolla durante un período mayor que puede demorar hasta 15 horas ($H/t=0,03 \text{ m h}^{-1}$). Durante la campaña del 20 de Abril del 2015 (Fig. 4.5c) se presencié el ingreso del agua de mar sobre la planicie y se midió la corriente superficial del agua ($0,50 \text{ m s}^{-1}$) tomando el tiempo recorrido por un objeto arrastrado por la corriente superficial en una distancia conocida. Se realizó en momentos cercanos a la altura máxima de la columna de agua. La columna de agua llegó a 0,20 m sobre la planicie en menos de 1 h ($H/t = 0,2 \text{ m h}^{-1}$), donde permaneció durante 4 h hasta empezar el drenaje que se demoró 5 h ($H/t = 0,04 \text{ m h}^{-1}$) (Fig. 4.5c).

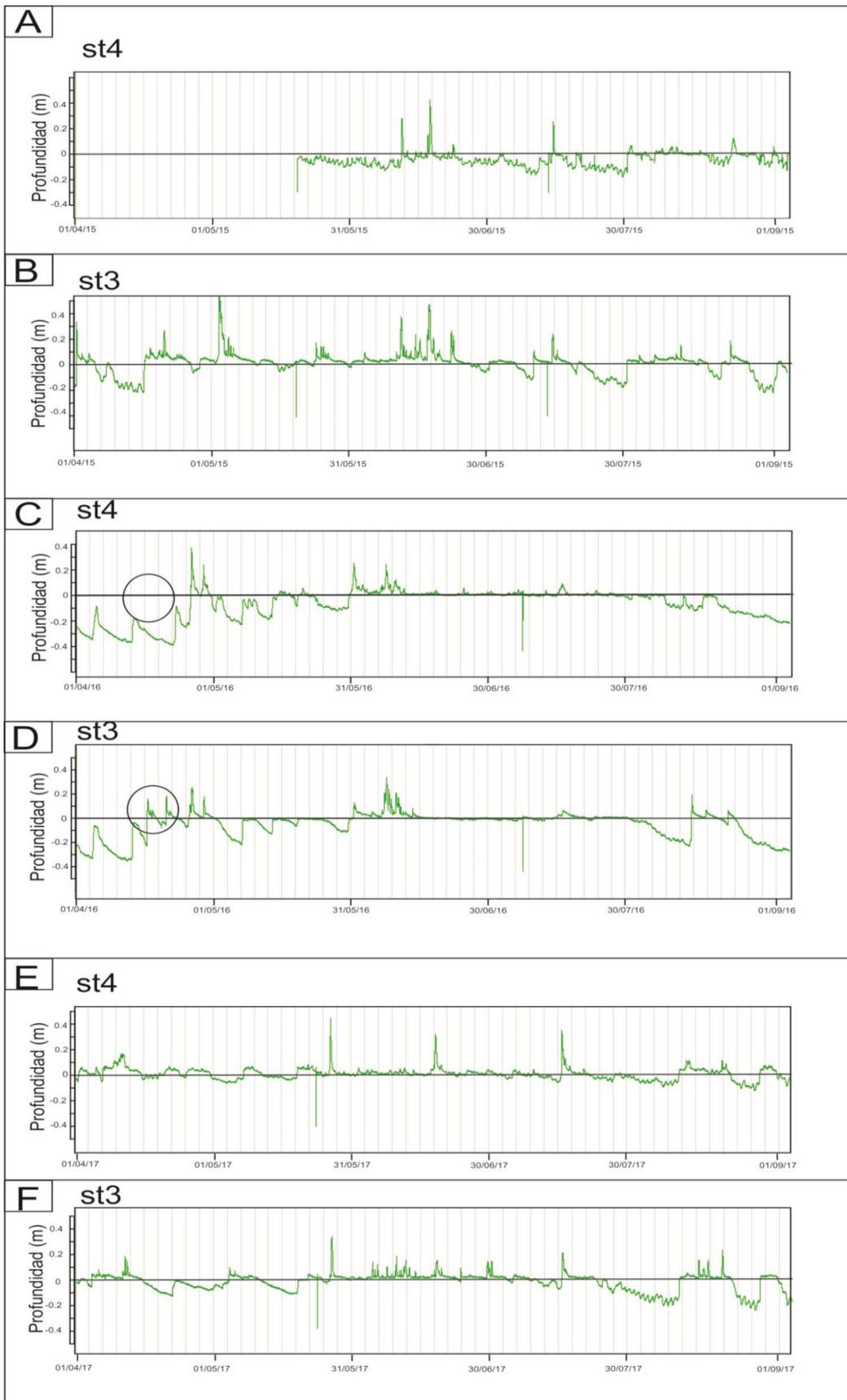


Figura 4.3. Registro de inundaciones de la St4 y St3 entre los meses de Abril a Septiembre de los años 2015, 2016 y 2017.

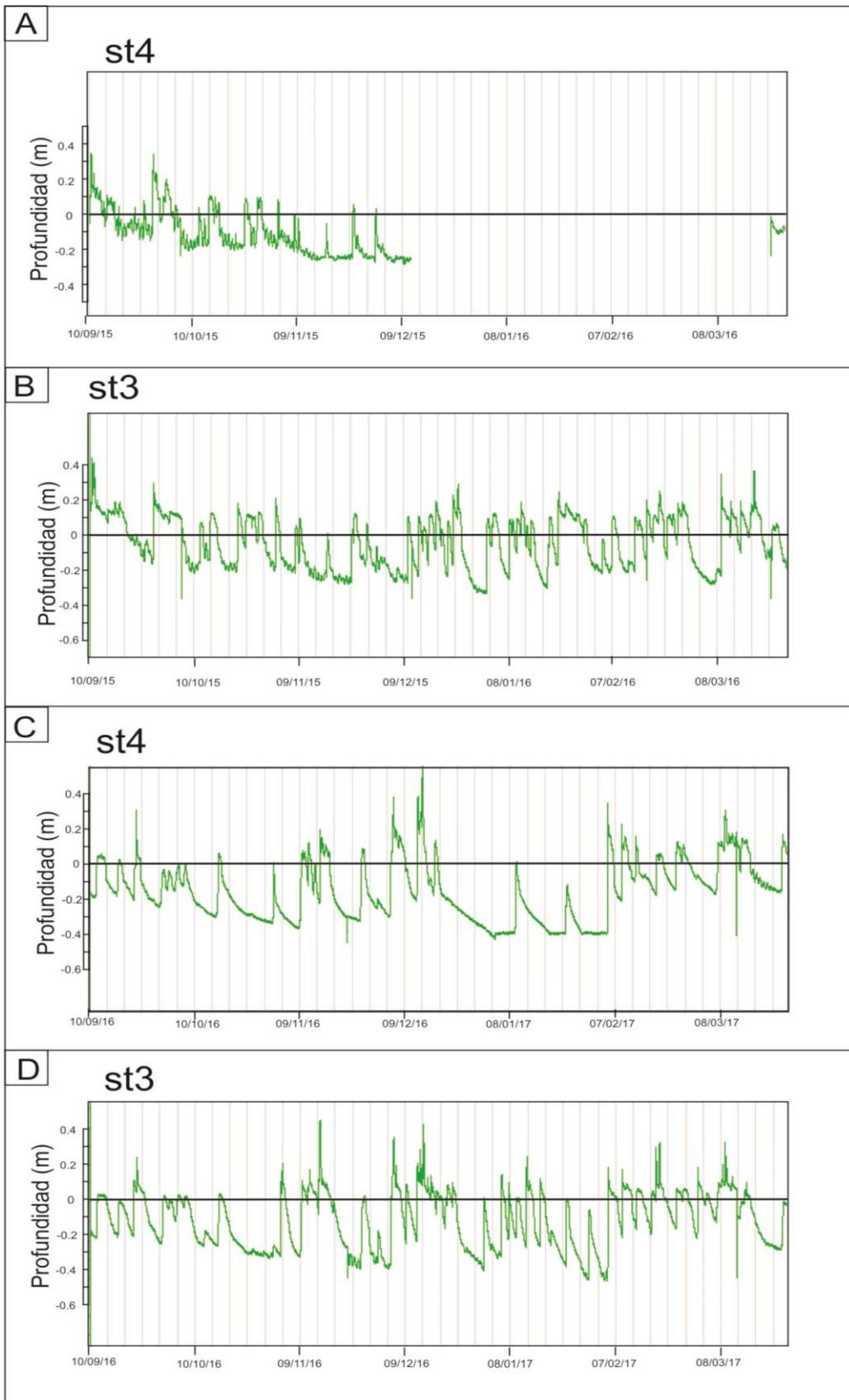


Figura 4.4. Registro de inundaciones de la St4 y St3 entre los meses de Septiembre a Enero de los años 2016 y 2017.

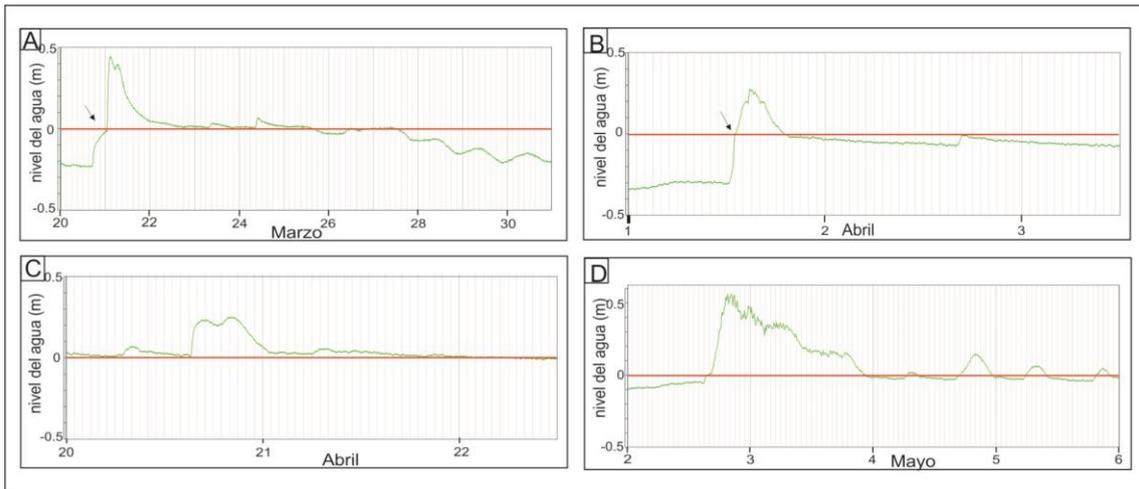


Figura 4.5. Registros de inundaciones de la St3. Registros en diferentes meses de la St3 donde se observa un rápido flujo frente a un reflujó gradual.

4.1.2. Variaciones de la planicie en diferentes estaciones del año

El nivel del agua presenta diferencias importantes entre invierno y verano (Fig. 4.6). En invierno la planicie colonizada mantiene la humedad de la inundación, ya sea porque el nivel de agua se encuentra inmediatamente por debajo de la superficie, o la planicie se encuentra sumergida en una delgada lámina de agua por varios días (Fig. 4.6a, b, c). Por otra parte, la energía de la corriente de flujo se puede reconocer sobre la planicie en base a las estructuras de deformación encontradas y su aspecto general (Fig. 4.7).

En la St3, posterior a la inundación de mayo en el año 2015 (Fig. 4.5d) se encontraron grandes fragmentos de matas (más de 1 m de largo) sobre la vegetación que crece sobre los márgenes laterales (Fig. 4.7a). Estos fragmentos formaron parte de la mata superficial que fueron erosionados y transportados por la corriente, depositándolos sobre los bordes del antiguo canal, en el máximo alcance de la inundación. También se observaron restos de pequeños trozos de mata indicando un nivel máximo de agua sobre la vegetación aledaña (Fig. 4.7b).

En verano la planicie colonizada por matas microbianas mantiene un aspecto seco debido a la exposición solar durante varios días consecutivos (Fig. 4.8a, b). En los registros se reconoció una fluctuación de agua por debajo de la superficie (Fig. 4.8c). En esta época del año es común encontrar la formación de grietas de desecación en la superficie, aunque el sedimento subsuperficial se mantiene húmedo (Fig. 4.8b).

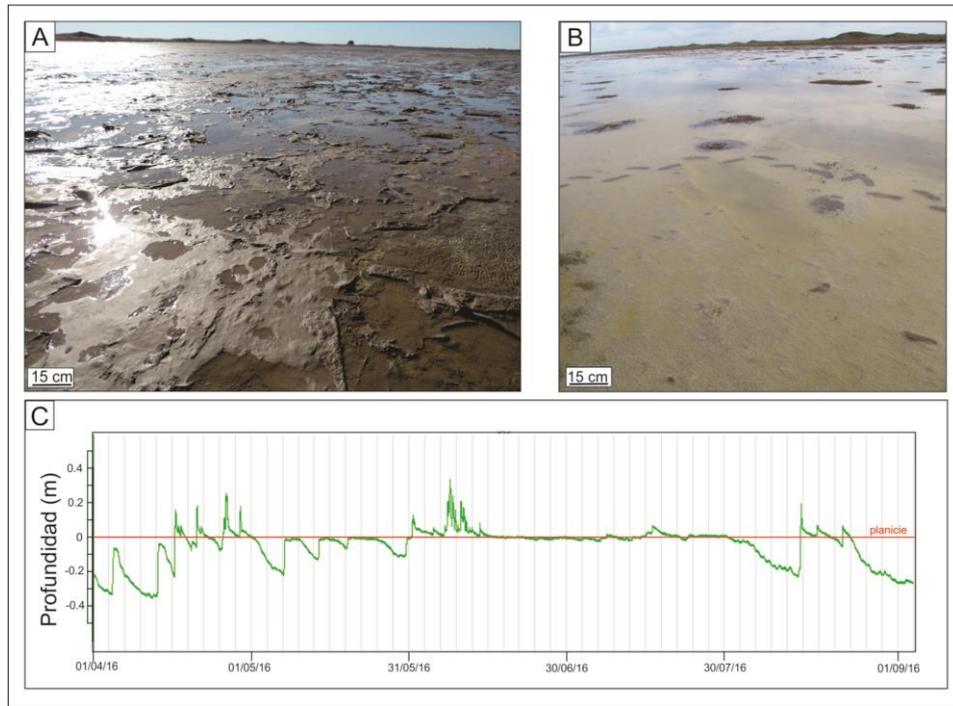


Figura 4.6. Aspecto de la planicie durante el invierno a) en la St3. b) en la St4. c) Registro de la inundación de la planicie en la St3 durante el invierno del año 2016. Se destaca el nivel de agua sobre la superficie durante varios días.

En algunas ocasiones, se observaron numerosas depresiones en la planicie, las cuales se encontraban inundadas (Fig. 4.8d). Se pudo reconocer la reducción de la superficie ácuea por efectos de la evaporación del agua de mar en forma de halos alrededor de los charcos (Fig. 4.8e), y se observó la formación de precipitados en los bordes o el interior de los charcos (Fig. 4.8f). Se apreció a simple vista cristales cúbicos de halita muy desarrollados de diferentes tamaños (~ 1mm). Se determinó la presencia de yeso, confirmado por difracción de Rayos X (Fig. 4.8g).

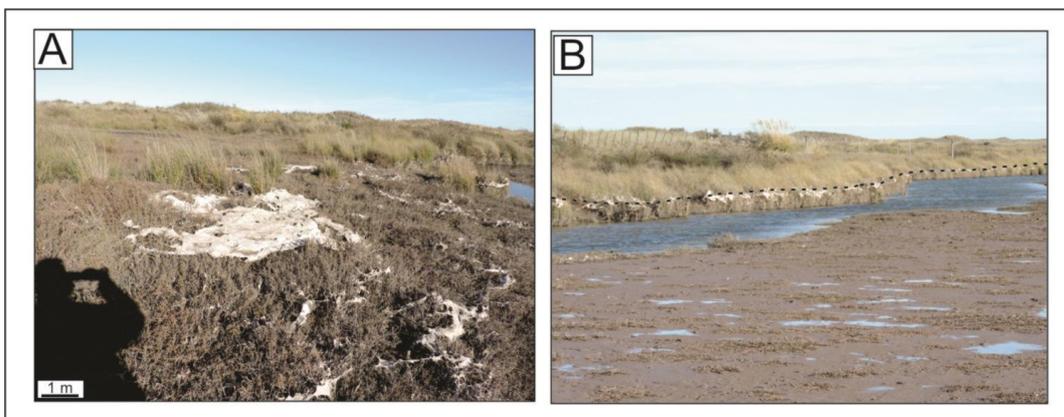


Figura 4.7 a) Fragmento de mata microbiana sobre la vegetación luego de ser transportado por la corriente. b) Aspecto de la planicie de Paso Seco, donde se observan pequeños fragmentos de mata microbiana sobre la vegetación aledaña indicando el nivel de agua que alcanzó la inundación.

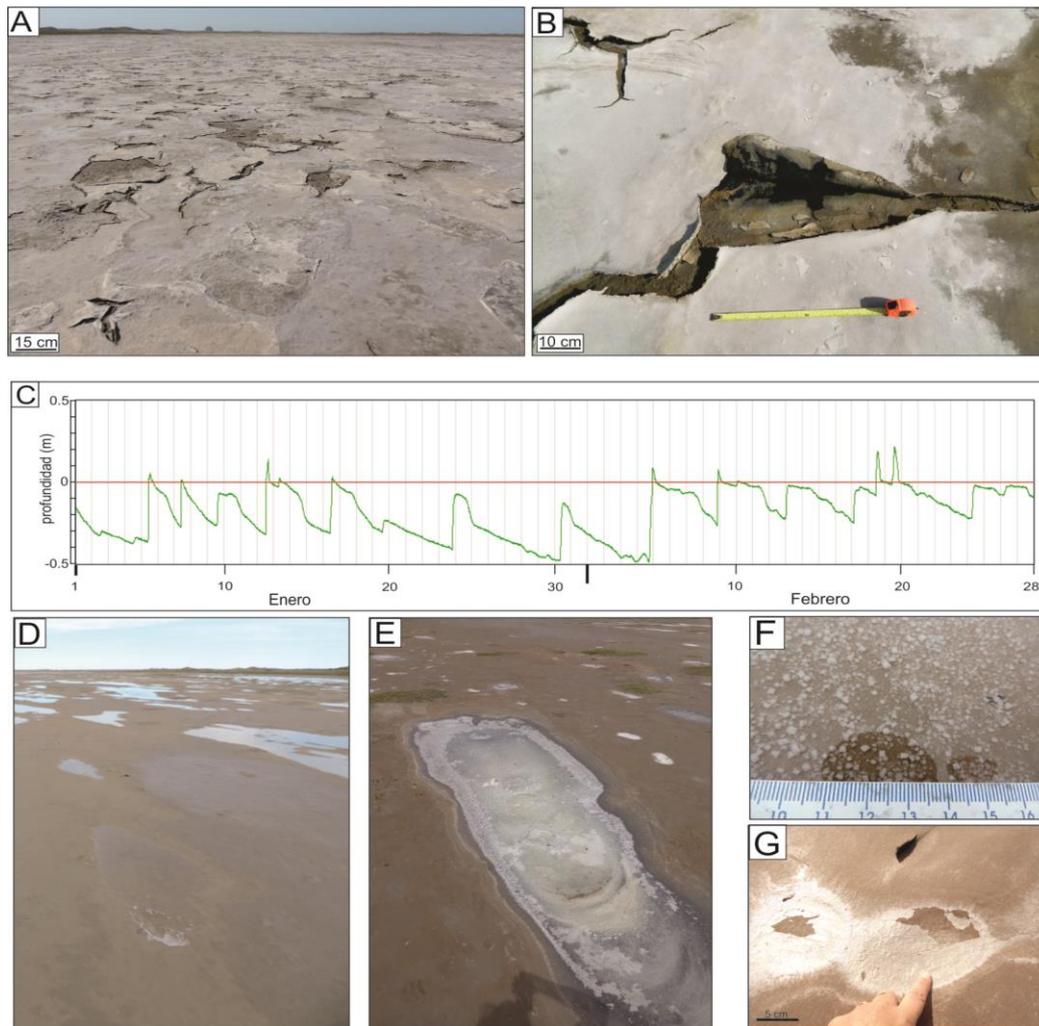


Figura 4.8. a) Planicie de Paso Seco durante la época estival, con un aspecto seco sobre la planicie. b) Grietas de desecación donde se observa el sedimento infrayacente conservando la humedad. c) Registro de nivel de agua sobre la planicie durante la época estival. Se observa que el nivel de agua permanece por debajo de la planicie durante 20 días consecutivos. d) Depresiones en la planicie con cuerpos de agua en su interior. e) Se reconoce la reducción de la superficie ácuea por efectos de la evaporación. Se observan halos de nivel de agua superior alrededor de los charcos. f) Presencia de halita en las depresiones. g) Precipitado de yeso.

4.1.3. Características del agua de mar: Salinidad, Eh, Ph y catión Ca

En la mayoría de las campañas se pudo medir el nivel de agua que se encontraba en los tubos ranurados que protegen los sensores. Ello permitió además medir la conductividad del agua por debajo de la planicie en ambas estaciones. Los valores de salinidad indican una variación de 53 a 96,5 g/L (Fig. 4.9). En general los valores muestran una mayor salinidad en la St3.

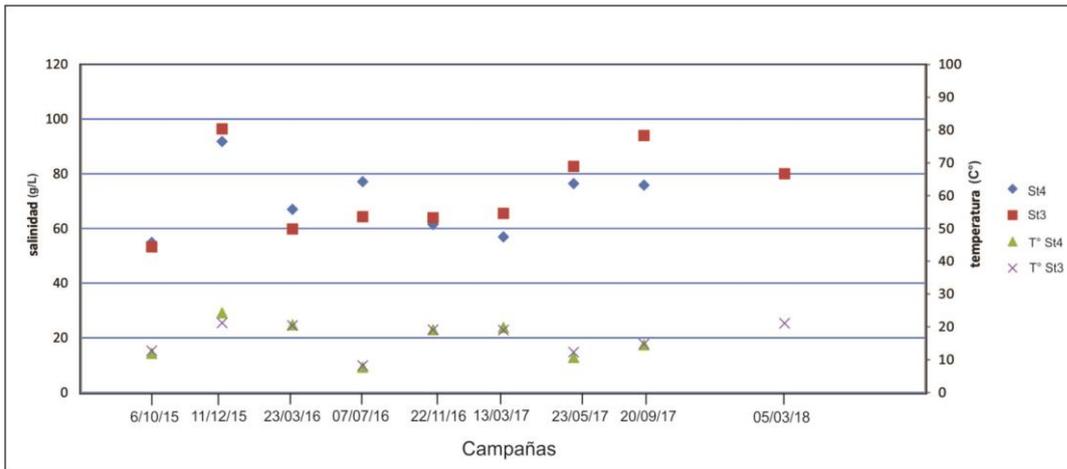


Figura 4.9. Valores de salinidad medidos en la planicie de Paso Seco a través de las campañas realizadas.

Comparando los valores entre campañas, la salinidad más elevada se obtuvo en Diciembre de 2015 presentando un valor de 91,8 para la St4 y 96,4 para la St3. La salinidad más baja en ambas estaciones coincidió con valores de 54,8 para la St4 y de 53,2 para la St3 en la campaña del 6 de Octubre de 2015, donde al mismo tiempo se desarrolló una inundación en la planicie por 9 días consecutivos sumado a precipitaciones los primeros 4 días de Octubre (16 mm). La salinidad del agua de mar cuando ingresa a la planicie es de 36,6 g/l.

Los resultados de Eh del agua varían entre -375 a 280 mV (Fig. 4.10), donde los más negativos se midieron en la St3 coincidiendo con meses estivales, donde estos valores posiblemente fueron causados por el menor volumen de agua en la planicie y por la presencia de microorganismos que inducen a una mayor actividad en los electrones. Los valores positivos se presentaron mayormente en los meses invernales en la St4 con valores mayores a 200 mV. Por otro lado, el pH del agua intersticial presentó valores entre 6,6 hasta 9,1 (Fig. 4.11), donde el pH más básico alcanzó valores cercanos a 9 en ambas estaciones.

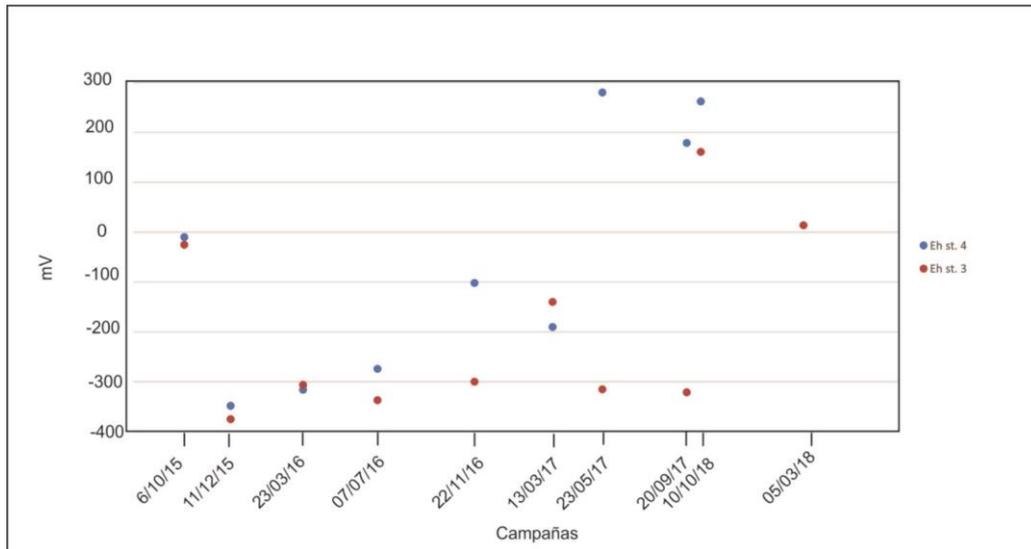


Figura 4.10. Valores de Eh del agua medidos en la planicie de Paso Seco.

Los resultados de salinidad de las muestras obtenidas en primavera de 2017 (septiembre y octubre de 2017, temperatura del agua: 15°C) (Tabla 4.2). Las muestras de agua corresponden a St3 (ST3 HOBO) y St4 (ST4 HOBO), dos depresiones (DEP 1 y DEP 2) cercanas a la St4 que mantenían el agua de la inundación previa (4 días antes), y del arroyo de marea (ST3 CANAL) que se compararon con el valor teórico promedio del mar (MAR). Se verificó que el agua extraída de los tubos es equivalente al agua intersticial ya que los valores de salinidad son similares (92 vs 99 g/L). La salinidad más

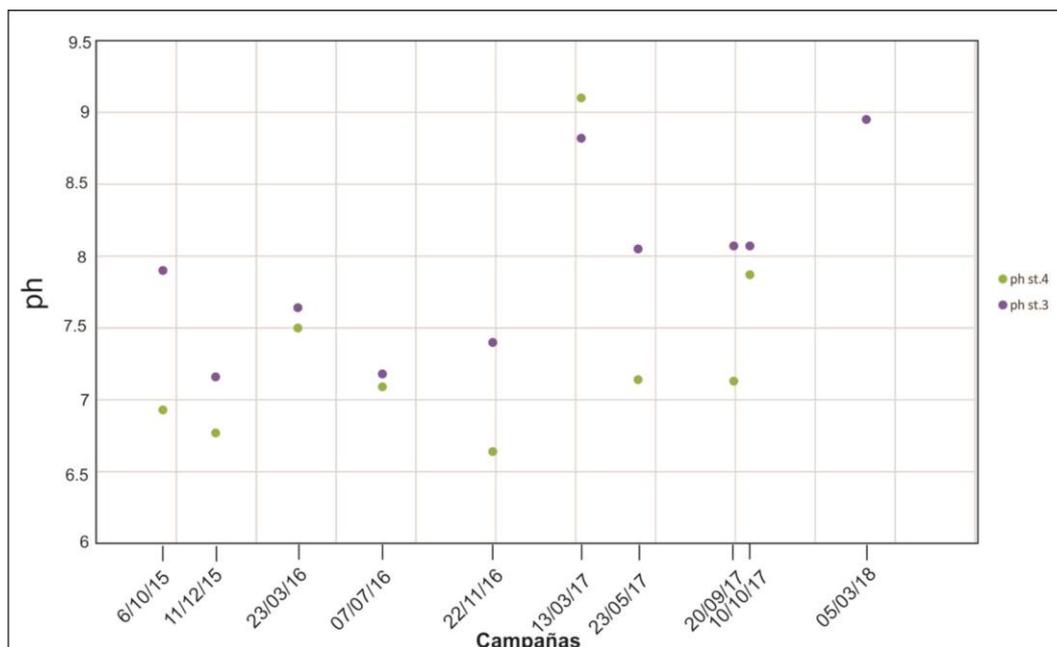


Figura 4.11. pH del agua medida en la planicie de Paso Seco a través de las campañas

baja la presenta el arroyo de marea, llegando a duplicar el valor normal del mar. La St4 presenta valores de salinidad menores a St3, mientras que las depresiones tienen altos valores hasta alcanzar el máximo valor (279 g/L) en el agua donde había precipitado halita (Fig. 4.12a). El ión Ca^{2+} (en mEq/L) aumentó a medida que aumentó la salinidad, hasta el valor de 202 g/L. A la salinidad de 279 g/L (precipitación de halita) la concentración del ión Ca^{++} en el agua disminuyó abruptamente (Fig. 4.12b).

Tabla 4.2. Datos de salinidad de St4 y St3 de la planicie de Paso Seco.

CAM-PAÑA	salinidad (gL^{-1})						
	MAR	ST4 HOBO	ST4 DEP 1	ST4 DEP 2	ST4 INTER	ST3 HOBO	ST3 CANAL
sep-17	34.29	91.66	202.51	279.41	99.35	115.37	67.95
oct-17	34.29	80.13	.	.	.	98.71	49.37

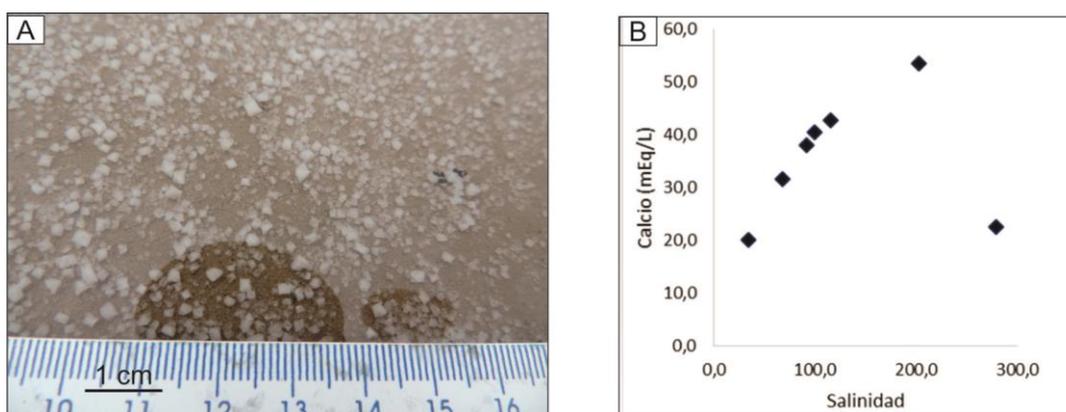


Figura 4.12. a) Precipitación de cristales de halita en las depresiones sobre la planicie. b) Comportamiento del ión Ca^{2+} (en mEq/L) con respecto a la salinidad

4.2. Características sedimentológicas de las biolaminitas

4.2.1. Sedimento colonizado

El sedimento de toda el área de Paso Seco se encuentra colonizado por microorganismos y fue analizado por medio de testigos extraídos de la planicie. Los testigos permiten identificar con facilidad las biolaminitas, las cuales están constituidas por una intercalación de niveles de matas microbianas con niveles de material clástico. La capa

superficial de mata microbiana presenta un espesor ≥ 1 cm, donde las cianobacterias se ubican cerca de la superficie para llevar a cabo la actividad fotosintética (Fig. 4.13a). La presencia de estas bacterias filamentosas se identifica por una lámina verdosa, tapizada por una fina lámina de color pardo claro debido a la presencia de un *biofilm* formado básicamente por diatomeas (Fig. 4.13b). Por debajo de los primeros mm se desarrolla una transición rápida hacia la anoxia, donde el sedimento se encuentra ennegrecido. Posteriormente, al oxidarse luego de varias horas permite ver la laminación del sedimento (Fig. 4.13c-f). La capa superficial se separa del sedimento infrayacente con relativa facilidad posiblemente por la actividad microbiana (capa activa) y por la presencia de una lámina de grano más grueso (Fig. 4.13g).

Las capas de arena que forman las biolaminitas presenta espesores entre 1.5 a 4 cm, compuestas de arena media. Las matas microbianas antiguas tienen hasta 1 cm de espesor y están constituidas por SPE, restos de diatomeas, cianobacterias y láminas muy finas de arena fina (< 1 mm de espesor). Los niveles de matas microbianas presentan gran flexibilidad por lo cual en muchos casos se presentan con una leve a moderada ondulación (Fig. 4.13c, e; flecha).

Al momento de abrir los testigos para observar la estructura interna, la humedad no permite apreciar con detalle la biolaminación. Luego de unas horas la pérdida de humedad permite identificar la biolaminación con más detalle, donde la base y techos de las laminitas se distinguen con facilidad. Si los testigos pierden mucha humedad los niveles de arena (capas > 1 cm) pueden llegar a desgranarse (Fig. 4.13g).

La distribución de niveles arenosos y niveles de mata microbiana cambia al comparar las dos estaciones de muestreo. En la St3 se puede encontrar más densidad de niveles de matas microbianas mientras que los niveles de arena rara vez superan 1,5 cm de espesor (Fig. 4.13e, f). Por otro lado, la St4 presenta mayor proporción de láminas de arena donde en ocasiones estas láminas pasan a formar capas > 3 cm (Fig. 4.13c, d). Una característica de estos niveles de arena es que frecuentemente presentan textura porosa con poros de ~ 1 mm de diámetro.

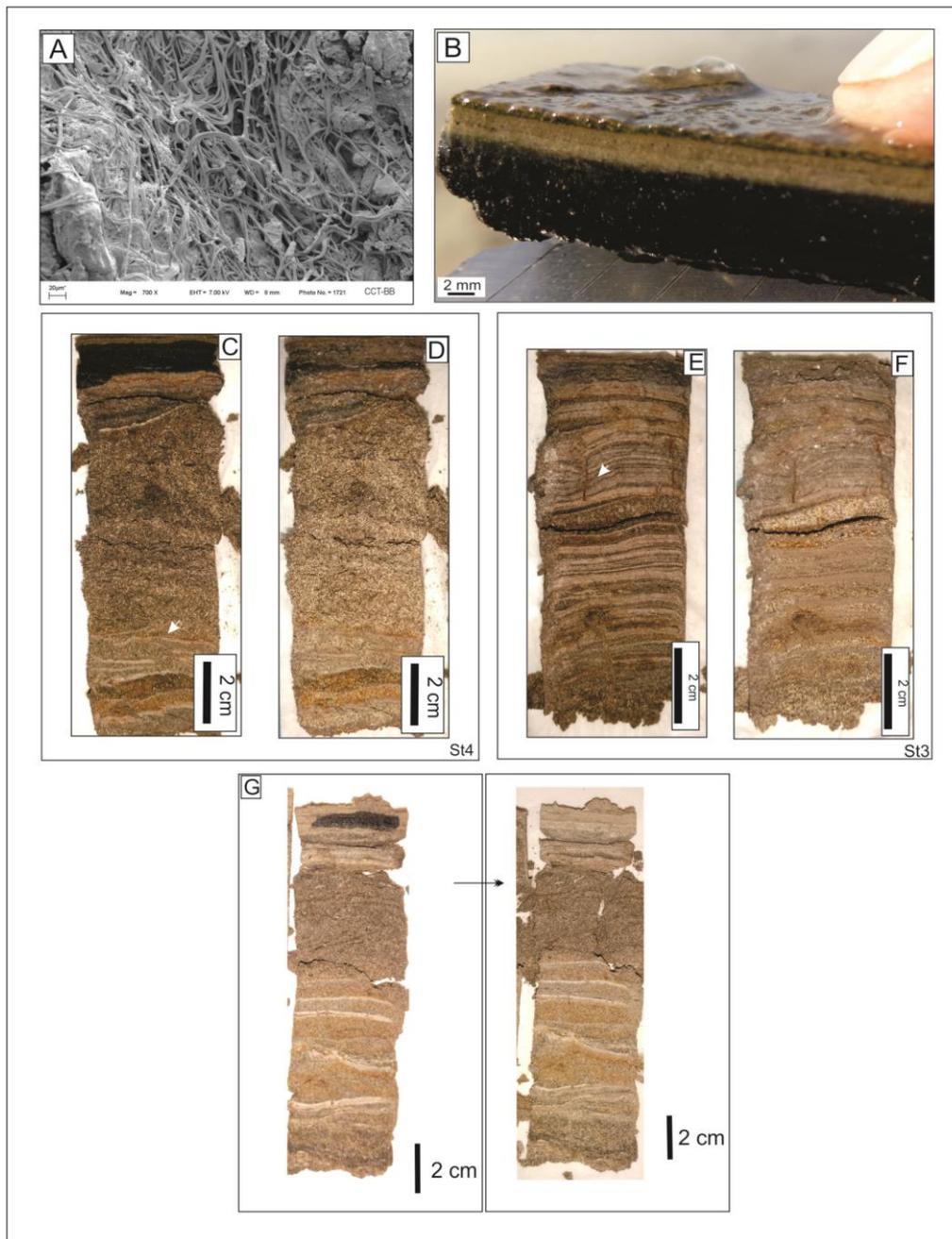


Figura 4.13. a) Microfotografía del microscopio electrónico de barrido donde se observan la gran densidad de filamentos de cianobacterias. b) Perfil de la mata microbiana de Paso Seco. La capa superficial de color pardo está compuesta por diatomeas, por debajo se desarrolla una capa verdosa, donde se encuentran las cianobacterias. c) Fracción de un testigo de sedimento correspondiente a la St4. La imagen fue capturada minutos después de separar longitudinalmente el testigo. d) Testigo correspondiente a (c) luego de perder la humedad. e) Fracción de un testigo de sedimento correspondiente a la St3. La imagen fue capturada minutos después de separar longitudinalmente el testigo. f) Testigo correspondiente a (e) luego de perder la humedad. g) Testigo de sedimento con humedad y sin humedad. En la segunda se observa como el nivel arenoso se desmorona por falta de humedad.

4.2.2. Granulometría

Los resultados de análisis granulométrico permitieron identificar por un lado que la mata microbiana superficial (nivel 1) presenta una distribución bimodal, donde los picos están representados por limo y por arena (Fig. 4.14). Comparando las dos estaciones se observó que en la St4 el sedimento tiene mayor granulometría, los picos más frecuentes se encuentran en el tamaño limo grueso y arena media (Fig. 4.14a). En cuanto a la St.3, los picos más frecuentes se encuentran en los tamaños de limo grueso y arena fina (Fig. 4.14b).

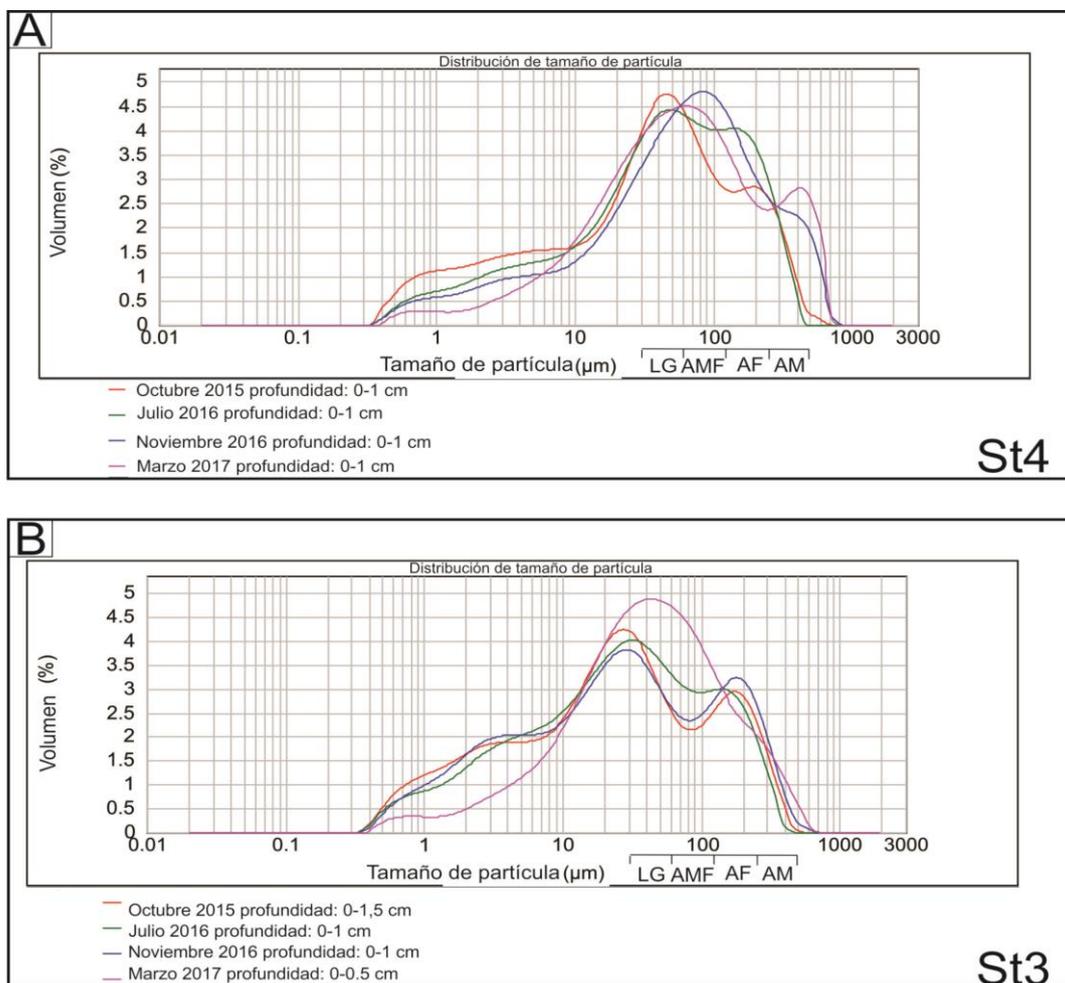


Figura 4.14. Análisis granulométrico del sedimento fino (mata microbiana) utilizando el Mastersizer 2000. a) St4. b) St3. LG: limo grueso. AMF: arena muy fina. AF: arena fina. AM: arena media.

Los niveles por debajo de la superficie, nivel 2 (~de 1 a 3 cm) y nivel 3 (~de 3 a 5 cm), presentan resultados similares para las muestras de la misma estación como también entre estaciones (Fig. 4.15 y Fig. 4.16). Hay predominio de arena fina > a 40%

del total del nivel, seguido por arena muy fina (entre 20 a 30 %), luego arena media (entre 10 y 20 %), y por último material pelítico (<10%).

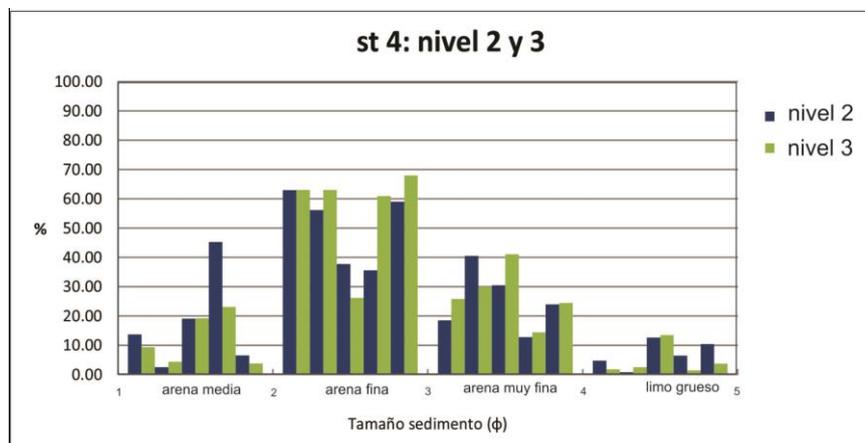


Figura 4.15. Análisis granulométrico mediante el método de tamiz de los niveles 2 y 3 correspondiente al sedimento de la St4.

Sin embargo, si en un testigo se discriminan las capas de arena (analizada por tamizado, “a” en Fig. 4.17) de las capas de matas microbianas (analizadas por difracción óptica con el equipo Mastersizer, “mm” en Fig. 4.17), la granulometría corresponde a tamaño arena fina y arena limosa respectivamente.

Los resultados así obtenidos fueron presentados en el diagrama ternario de caracterización granulométrica de los sedimentos (Fig. 4.18) y permiten identificar esta diferenciación entre capas de arena y capas de matas microbianas. Un mayor detalle

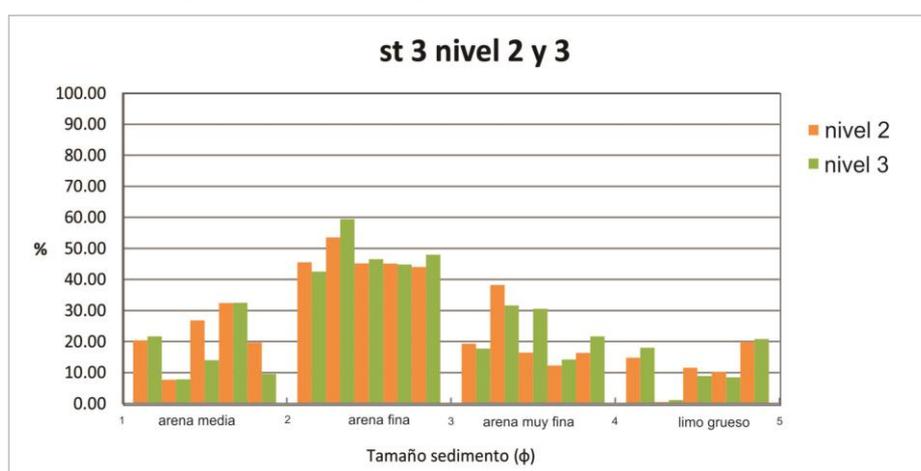


Figura 4.16. Análisis granulométrico mediante el método de tamiz de los niveles 2 y 3 correspondiente al sedimento de la St3.

para el sedimento fino se obtiene con los gráficos resultantes del equipo Mastersizer

donde se observa una bimodalidad en todas las muestras procedentes de matas microbianas (Fig. 4.19). Los picos resultantes indican la presencia de dos modas, una en limo grueso y la otra en arena fina.

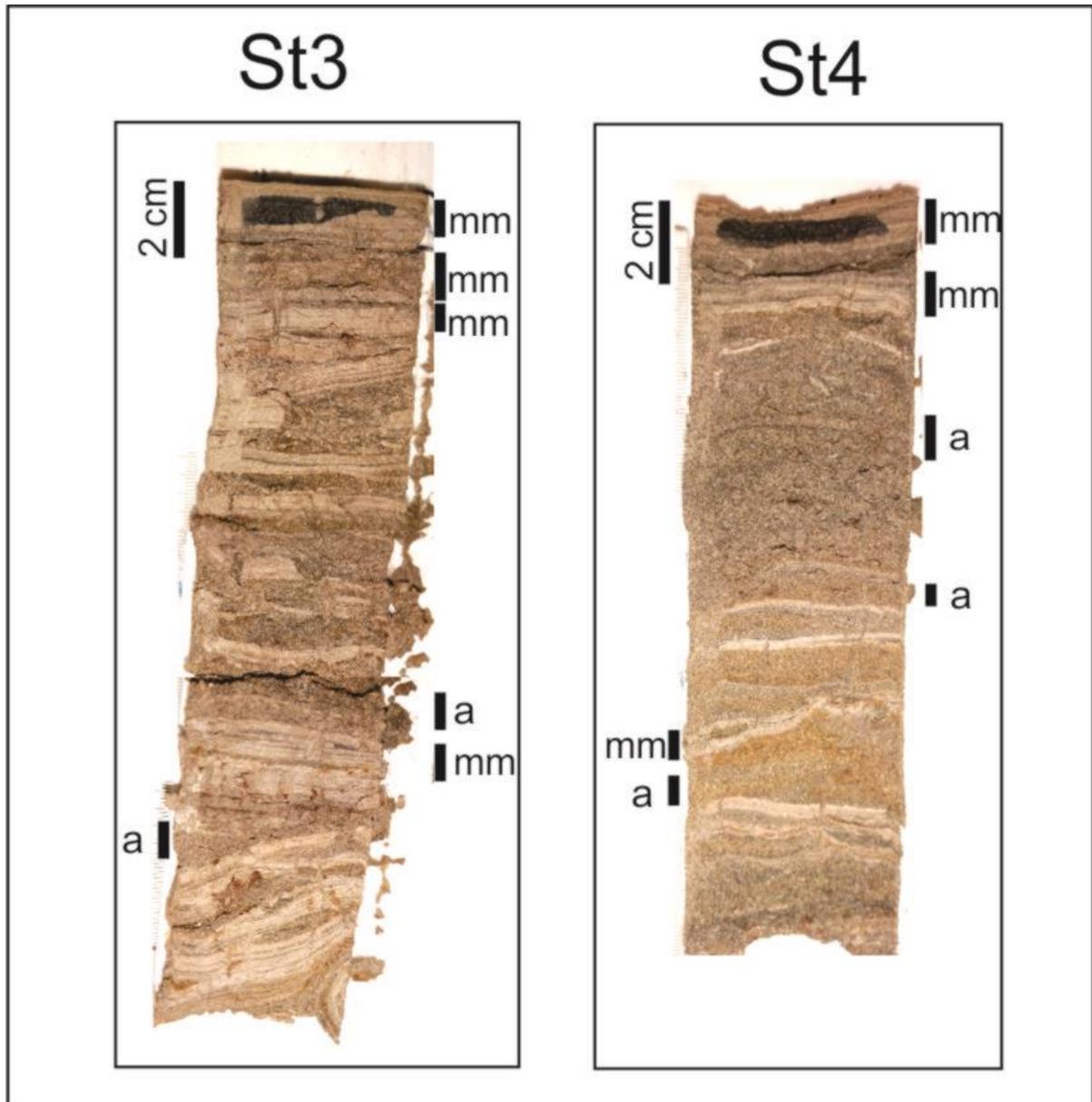


Figura 4.17. Ejemplo de testigo que se utilizó para el segundo método aplicado para medir granulometría. Las capas identificadas por a (arena) se analizaron por medio de tamizado y las capas identificadas por mm (matas microbianas) se analizaron por medio del Mastersizer.

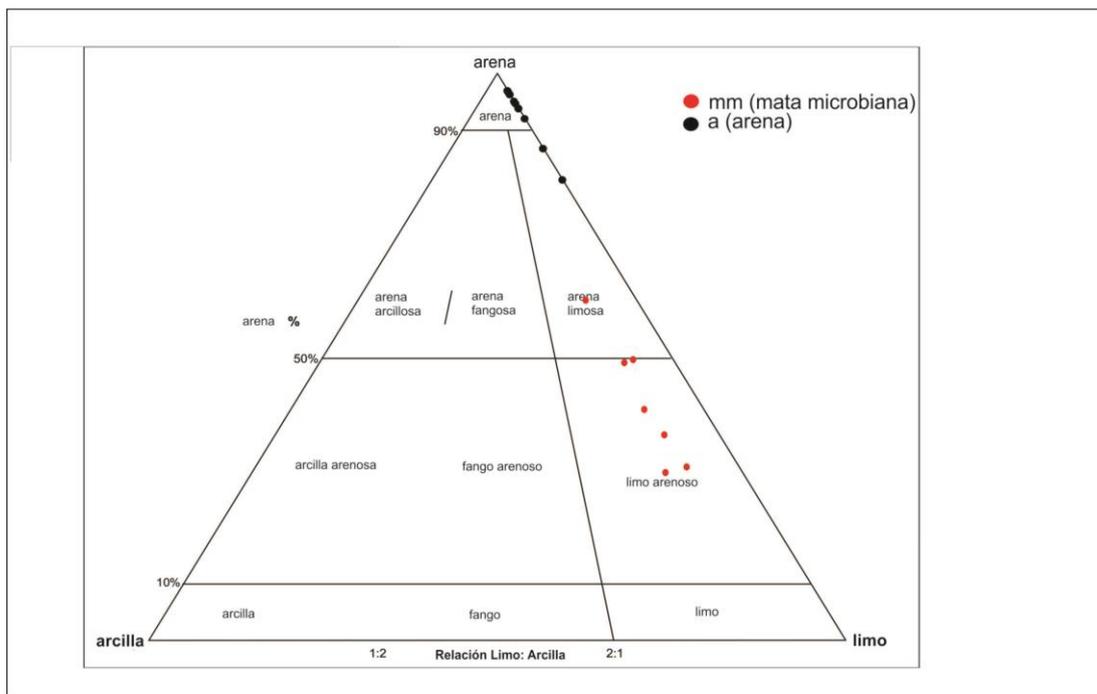


Figura 4.18. Diagrama ternario de caracterización granulométrica de los sedimentos según la clasificación de Folk (1954).

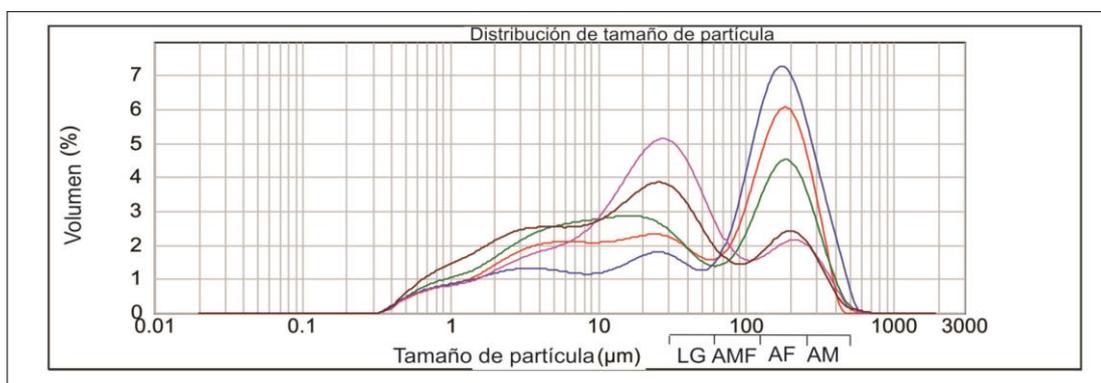


Figura 4.19. Análisis granulométrico de la capa de mata microbiana (mm de la Fig. 17) representado mediante un gráfico del Mastersizer 2000. LG: limo grueso; AMF: arena muy fina; AF: arena fina; AM: arena media.

4.2.3. Eh, pH y Temperatura del sedimento

El sedimento superficial se presenta en el campo con colores marrones, y se identifica como nivel óxico, al contrario de la capa subsuperficial que se define como

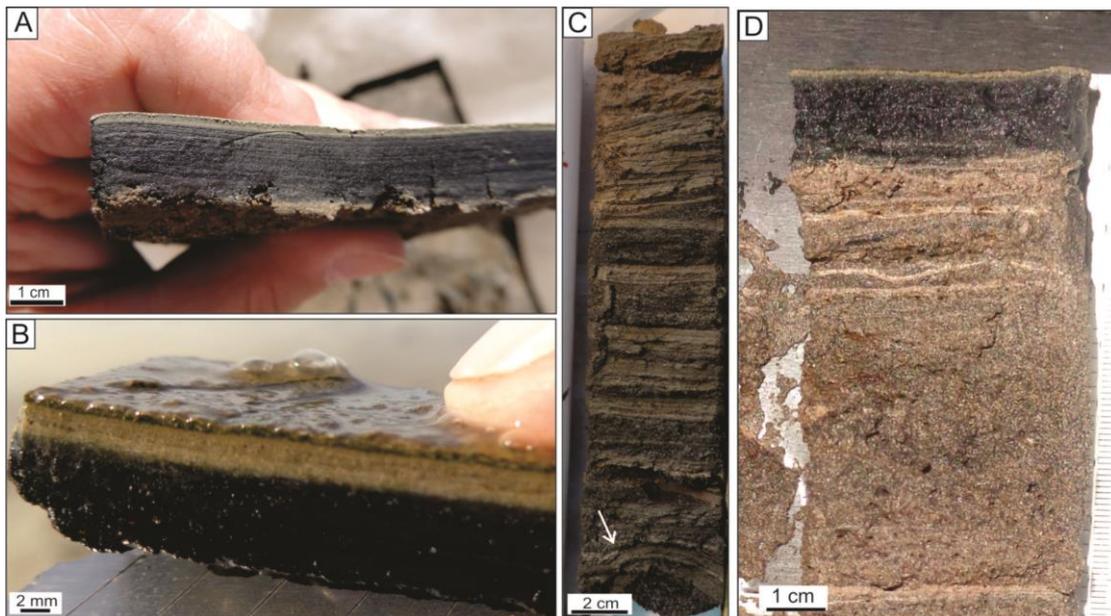


Figura 4.20. a) Perfil de sedimento donde se observa con claridad la capa superficial de 1 mm de color parda clara seguido por debajo con un cambio de color brusco, consecuencia de la anoxia. b) Perfil de sedimento de Paso Seco recién cortada. En la capa superficial se observa una lámina de color pardo claro con burbujas producto de la fotosíntesis. Por debajo se observa una fina lámina de color verdoso donde se ubican las cianobacterias. Ambas forman parte de la capa óxica que se encuentra sobre la capa anóxica (de color negro). c) Testigo de sedimento de la St3 donde se observa la biolaminación producto de las matas microbianas. El testigo perdió humedad y con ella la parte anóxica se oxida y pierde la coloración oscura flecha: deformación de biolaminita d) Testigo de sedimento de la St4. Se observa la capa anóxica de hasta un 1 cm de espesor y por encima se observa una capa verdosa donde se encuentran las cianobacterias junto con diatomeas por arriba. La capa de arena de más de 5 cm de espesor muestra textura porosa. Las matas microbianas se presentan de coloración parda clara en laminaciones.

nivel anóxico, presentando colores grises oscuros a negros (Fig. 4.20). Durante el período estudiado, la temperatura superficial del sedimento varió entre 9 y 32,9 °C y la subsuperficial varió entre 8,8 y 33,4° C (Fig. 4.21) en relación a la estación del año.

El pH del sedimento en el área de estudio se encuentra entre los 6,6 a 8,5 (Fig. 4.22). Con estas condiciones el ambiente presenta una naturaleza neutro a alcalino. El pH presenta una distribución similar en las capas superficial y subsuperficial.

El Eh del sedimento entre la capa superficial y subsuperficial varió entre 100 mv a -350 mv (Fig. 4.23), con valores negativos en la mayoría de los casos. Generalmente los valores de la superficie son más positivos que los valores subsuperficiales. El rango de los valores de la capa superficial varió entre 74 y -221 mV, donde los valores mas negativos se presentaron en época estival. Por otro lado, los valores de la capa subsuperficial varían de 23 a -340 mV. La mayor diferencia entre las 2 capas se observó en la campaña de Marzo de 2017, donde ambos valores fueron

negativos, en superficie presentó un valor de -84 mV y la capa subsuperficial llegó a -340 mV.

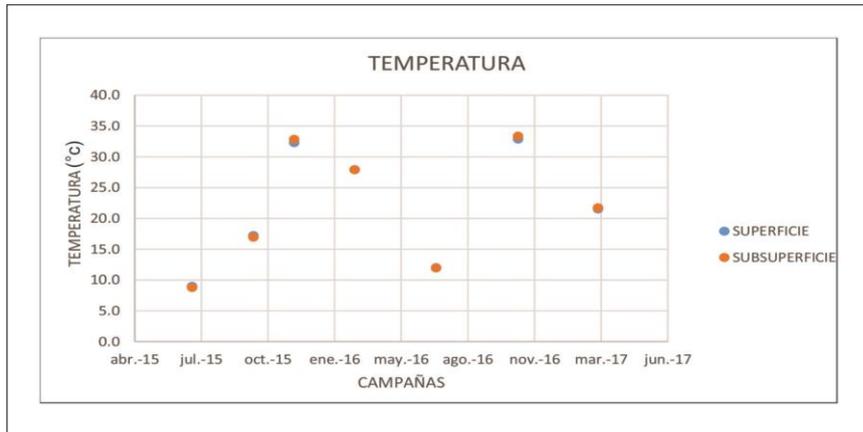


Figura 4.21. Temperatura superficial y subsuperficial del sedimento de la planicie en las diferentes campañas.

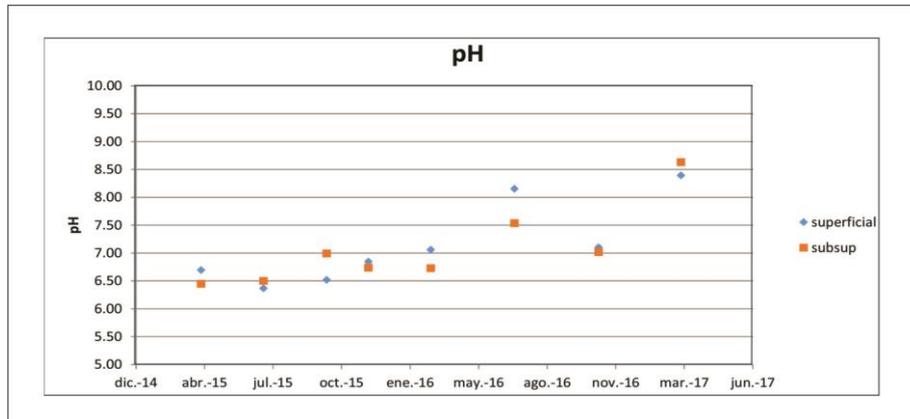


Figura 4.22. pH del sedimento superficial y subsuperficial de la planicie medidos en las diferentes campañas.

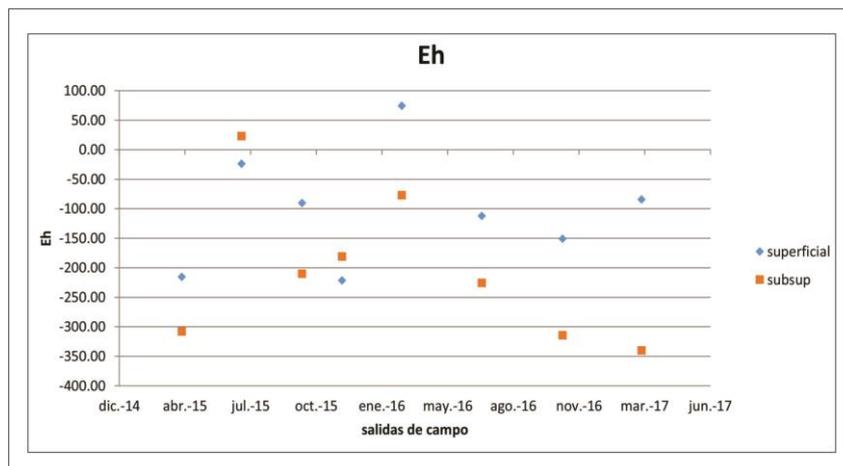


Figura 4.23. Eh del sedimento superficial y subsuperficial de la planicie medidos a través de las campañas.

4.2.4. Contenido de humedad y materia orgánica del sedimento

Para el cálculo de porcentaje de humedad, el testigo de sedimento se dividió en 3 niveles de acuerdo al cambio de textura y color, donde el nivel 1 se identificó con facilidad por presentar un color oscuro. El rango de los valores se mantuvo entre 40,92% a 19,48% (Fig. 4.24). Se encontraron diferencias significativas entre los tres niveles, donde el nivel 1 presenta el mayor porcentaje de humedad (30 a 40%) y disminuye en profundidad (Tabla 4.3). Por otro lado, comparando un mismo nivel entre las dos estaciones, el porcentaje de humedad tendió a ser significativamente mayor en la St3 que en St4 (Fig. 4.25). El porcentaje de humedad del nivel 1 en las dos estaciones es mayor en invierno. La campaña de Julio de 2015 es la única fecha donde el nivel 1 en la St4 presenta mayor humedad que la St3. Esa muestra coincide con el menor espesor muestreado (0,2 cm).

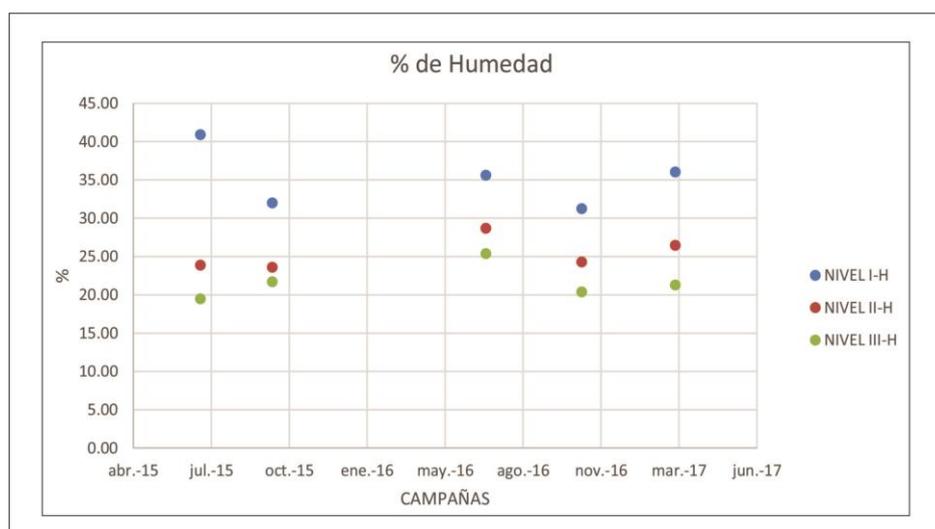


Figura 4.24. Porcentaje de humedad de testigos de sedimento de acuerdo a los 3 niveles. Nivel I se encuentra en la superficie. Nivel II y III son consecutivos al nivel I en profundidad. Los espesores varían en cada nivel (ver Tabla 4.3).

El contenido de materia orgánica (MO) reveló una tendencia similar a los resultados de humedad. En general, la St3 presentó mayor porcentaje de MO que la St4. Los valores se encuentran entre 1,54% a 9,26% (Fig. 4.26). Al comparar los tres niveles muestreados, se observa que los valores más altos de MO se encuentran en el nivel superior (nivel 1) y disminuyen en profundidad (Fig. 4.25). Ello significa que el nivel 1, correspondiente a la mata microbiana activa, presenta mayor porcentaje de MO.

Tabla 4.3. Porcentaje de humedad de diferentes niveles en profundidad del sedimento de Paso Seco.

SECCION	ESPE-SOR	CARACTERISTICAS	HUMEDAD (%)
NIVEL I	0.2 -1.5 cm	Es la mata superficial, generalmente se separa fácilmente del resto del testigo.	30 a 40
NIVEL II	1.5- 2 cm	Laminitas de sedimento fino de diferentes espesores, donde el límite inferior es una capa de arena la cual permite una fácil separación del nivel.	22 a 30
NIVEL III	1.5-3 cm	Laminitas de sedimento fino de diferentes espesores, con niveles de arena intercaladas.	18 a 25

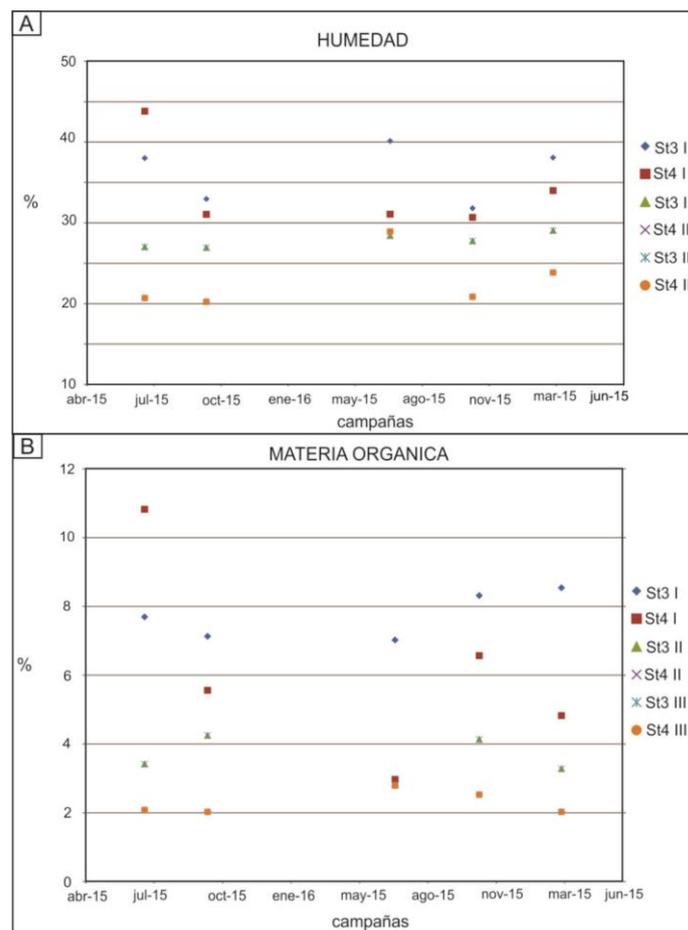


Figura 4.25. Porcentaje de humedad y materia orgánica de nivel I, II y III de St3 y St4.

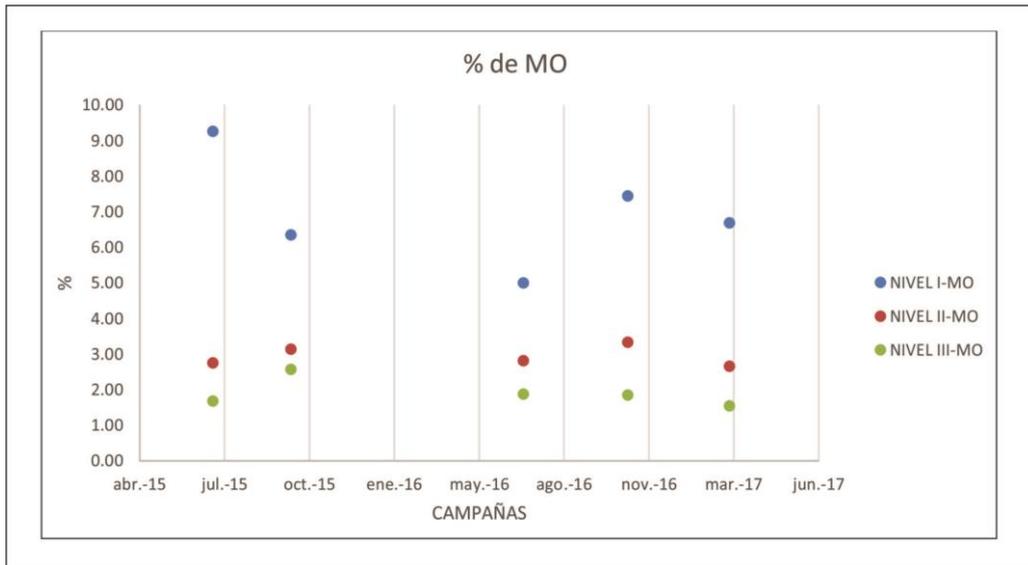


Figura 4.26. Porcentaje de materia orgánica en el sedimento Las muestras analizadas fueron las mismas que se utilizaron para los cálculos de humedad.

4.2.5. Carbono total (CT)

Los resultados del carbono total (CT), como sumatoria de carbono orgánico (CO) e inorgánico (CI), demostraron que varía de acuerdo a la profundidad y espesor de la muestra. A mayor profundidad el porcentaje es menor, y por otro lado a menor espesor de la muestra el porcentaje es mayor (Fig. 4.27). El nivel 1 de las dos estaciones presenta

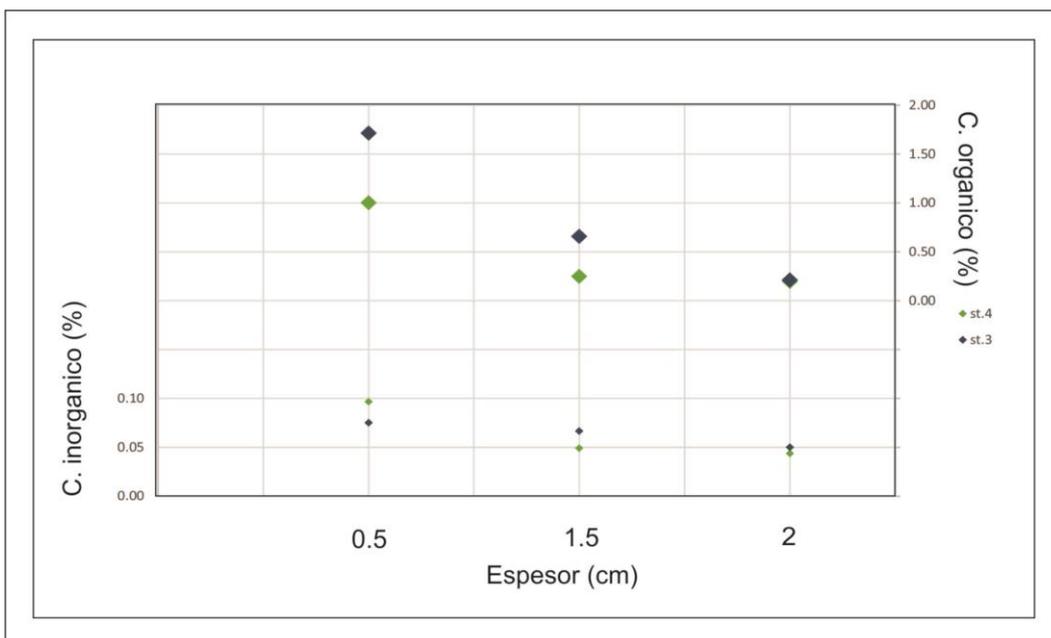


Figura 4.27. Resultados del carbono total (CT), orgánico (CO) e inorgánico (CI) en muestras de diferente profundidad. Se compara el sedimento de St3 y St4.

el mayor porcentaje de CT, donde los valores más elevados se encuentran en la St3 (Tabla 4.4). Comparando la naturaleza del carbono, los resultados confirman que el porcentaje de CO es superior al porcentaje de CI en todos los casos.

En ambas estaciones, las capas de matas microbianas superficiales activas presentan el porcentaje más elevado de CT y de CO, y la capa con menor porcentaje de carbono se encuentra en el nivel 3 de las dos estaciones donde el sedimento corresponde a una muestra de arena en el caso de la St4 y una muestra con mata microbiana pero gran proporción de arena en la St3. Estos resultados indican que donde hay presencia de mata microbiana, el porcentaje de CO y CI es mayor. Cuando el porcentaje de sedimento clástico aumenta el porcentaje es menor.

Tabla 4.4 Porcentaje de Carbono total, orgánico e inorgánico de testigos de sedimento de St3 y St4.

	Muestra	Espesor	Característica	CT (%)	CI (%)	CO (%)
st4	nivel 1	0.5 cm	mata microbiana superficial	1.35	0.10	1.00
	nivel 2	1.5 cm	mata microbiana con poca proporción de arena	0.30	0.05	0.25
	nivel 3	2 cm	arena	0.24	0.04	0.20
st3	nivel 1	0.5 cm	mata microbiana superficial	1.79	0.08	1.71
	nivel 2	1.5 cm	mata microbiana con poca proporción de arena	0.72	0.07	0.66
	nivel 3	2 cm	arena	0.26	0.05	0.21

4.3. Petrografía

Los cortes delgados petrográficos del sedimento colonizado permitieron identificar y caracterizar patrones de sedimentación característicos de las matas microbianas. Se observó una abundancia de restos de conchillas de bivalvos (Fig. 4.28a, b), foraminíferos (Fig. 4.28c, d), ostrácodos (Fig. 4.28e, f), restos de diatomeas y cianobacterias (Fig. 4.28g, h). Con respecto a la composición mineralógica se encuentran fragmentos líticos volcánicos, cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, anfíboles y piroxenos.

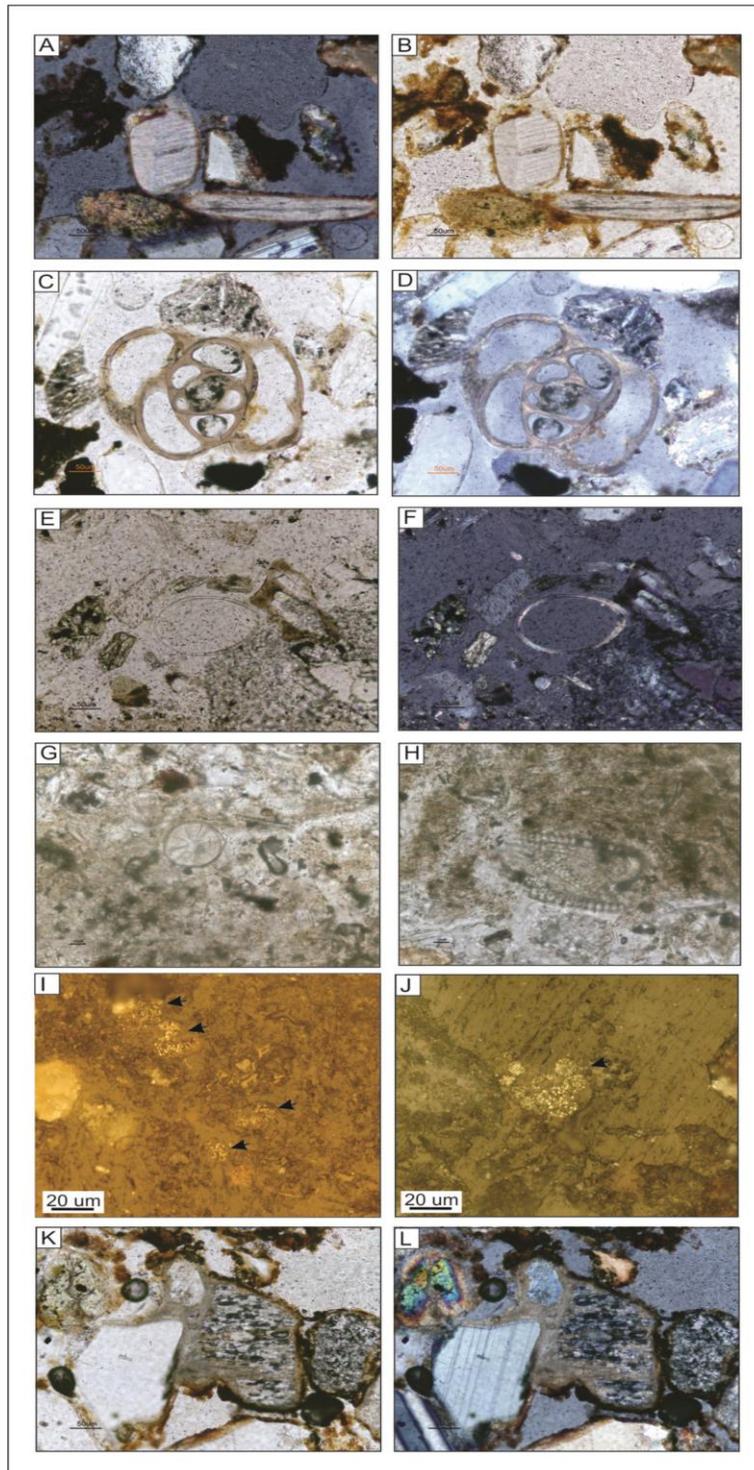


Figura 4.28. Imágenes obtenidas a través de microscopio petrocalcográfico. a) Restos de conchillas de bivalvos, con nicoles paralelos. b) con nicoles cruzados. c) Foraminífero, con nicoles paralelos. d) con nicoles cruzados. e) Ostrácodo con nicoles paralelos. f) con nicoles cruzados. g) Restos de diatomeas con nicoles paralelos. h) restos de cianobacterias con nicoles paralelos. i) Granos de magnetita (flecha negra). j) Granos de pirita framboidal. k) coating o revestimientos de precipitado micrítico como también de composición férrica alrededor de diferentes granos. l) con nicoles cruzados.

Por medio de la calcografía se pudo apreciar granos de magnetita y pirita, esta última desarrollando hábito framboidal dispuestos generalmente en niveles clásticos (Fig. 4.28i, j). Se pueden encontrar numerosos *coatings* o revestimientos de precipitado micrítico como también de composición férrica alrededor de diferentes granos (Fig. 4.28k, l). Una característica de los cortes delgados en Paso Seco es el desarrollo de una laminación, la cual se la puede correlacionar con las identificadas en las muestras de campo. Esta laminación está compuesta por una alternancia de láminas de diferente composición, granulometría y espesor, donde se destacan granos de tamaño de arena

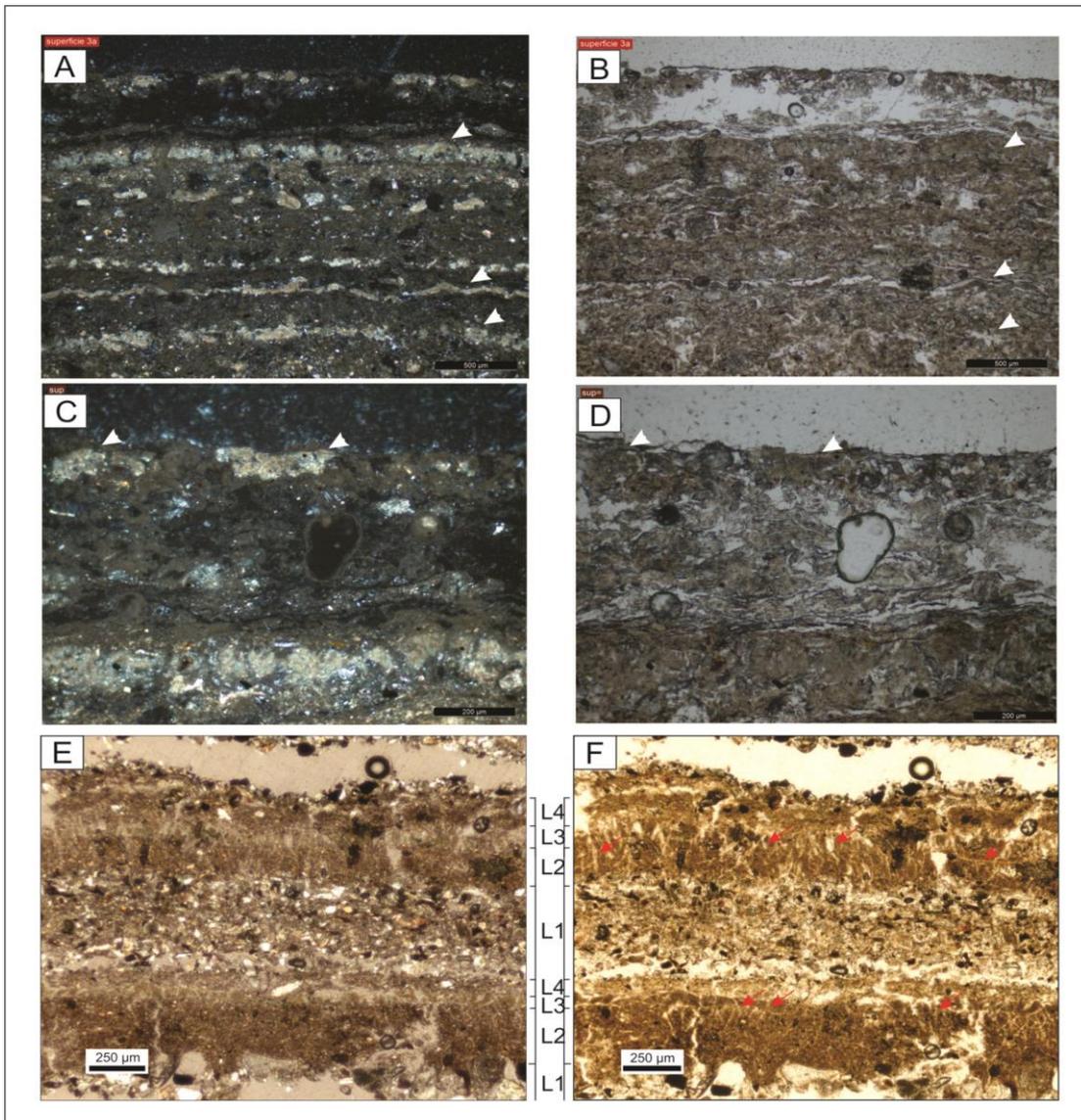


Figura 4.29. Imágenes realizadas a través de microscopio petrográfico. a) Imagen de corte delgado donde se observan niveles continuos de precipitado carbonático donde algunos niveles se encuentran atravesados por moldes de filamentos de cianobacterias, con nicoles cruzados. b) (a) con nicoles paralelos. c) Precipitado carbonático con formas redondeadas alargadas respetando un nivel determinado (flechas blancas). d) (c) con nicoles paralelos. e) Imagen donde se observa 2 secuencias de ~2 mm de espesor con los 4 niveles descritos en cada una, con nicoles cruzados. f). (e) con nicoles pa-

fina, material pelítico con materia orgánica y precipitado carbonático de tamaño micrítico. Es interesante remarcar que el precipitado carbonático se presenta con dos morfologías diferentes. Por un lado como láminas continuas (Fig. 4.29a, b), donde alguna de ellas se encuentran atravesadas por moldes de cianobacterias verticales a sub-verticales. Por otro lado el precipitado se desarrolla con formas redondeadas alargadas respetando un nivel determinado (Fig. 4.29c, d). Luego del análisis detallado de los cortes delgados se logró definir un patrón de alternancia de capas de arena, láminas de material pelítico junto con SPE y materia orgánica generadas por el crecimiento de matas microbianas. La capa de arena está compuesta por granos de cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasa, piroxenos, anfíboles, líticos volcánicos, líticos sedimentarios y restos de ellos, que por la estructura característica pueden identificarse (ostrácodos, conchillas, etc.). Se definieron cuatro láminas desarrolladas en un espesor de 2 mm (Fig. 4.29e, f) compuesta de base a techo de la siguiente manera:

Lámina 1: Láminas de arena fina a media con espesores que varían de 0.15 a 0.5 mm. El contacto inferior con la lámina infrayacente es neto. Comúnmente se observa una gradación normal de granos más gruesos en la base, a más finos hacia la parte superior. La composición mineralógica de los granos es de cuarzo, líticos volcánicos, piroxenos y anfíboles, y gran variedad de opacos, entre ellos magnetita. El espacio entre los granos, suele estar ocupado por materia orgánica amorfa (probablemente SPE) que comúnmente forma envolturas concéntricas alrededor de los granos de aproximadamente 10 μm de espesor que, ocasionalmente, son de calcita micrítica. En algunas de estas láminas se observa piritita framboidal en la materia orgánica que rodea los granos (Fig. 4.30a, b, flecha 1).

Lámina 2: Por encima de la Lámina 1) se encuentra una lámina de material muy fino, de color marrón con nicoles paralelos, y fluorescentes, de hasta 400 μm de espesor. Esta lámina se compone de granos de tamaño arcilla a limo fino y materia orgánica amorfa (probablemente SPE) en conjunto con cianobacterias degradadas y diatomeas con variado grado de conservación. Presenta moldes alargados irregulares de hasta 20 μm de diámetro, que corresponden a la presencia de haces de filamentos de cianobacterias. Estos moldes muestran predominantemente una orientación subvertical pero también existen moldes con orientación subhorizontal en la parte inferior de la lámina que se curvan hasta alcanzar la orientación subvertical en la parte media o superior (Fig. 4.30c, d, flecha 2).

Lámina 3: Por encima se encuentra un nivel entre 50 μm y 200 μm de espesor de calcita micrítica densa. La lámina de carbonato presenta moldes alargados subverticales como los de la lámina inferior que muy comúnmente están en continuidad con los de la lámina infrayacente. Algunas láminas de carbonato presentan pirita framboidal dispersa (Fig. 4.30c, d, flecha 3).

Lámina 4: Por encima del carbonato de calcio se encuentra un nivel entre 75 μm y 100 μm de espesor de materia orgánica de color marrón con nicoles paralelos. La materia orgánica muestra una textura laminada horizontal y está compuesta por materia orgánica amorfa, diatomeas y vainas de cianobacterias. Esta lámina presenta granos dispersos de tamaño limo y arcilla entre la materia orgánica (Fig. 4.30c, d, flecha 4).

4.4. Análisis de Difracción de Rayos X

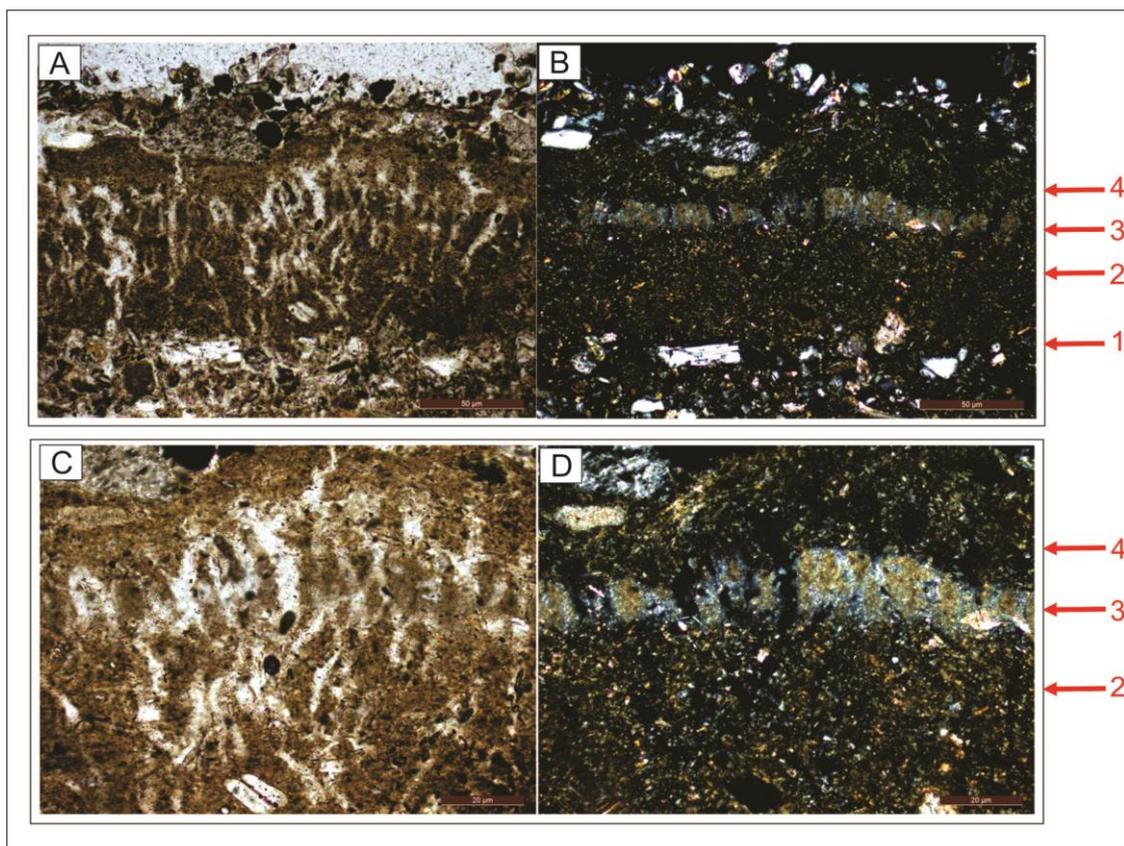


Figura 4.30. Imagen de las secuencias encontradas en los cortes delgados. a) Se observa la secuencia donde están señaladas la laminación 1, 2,3 y 4 con nicoles paralelos. b) (a) con nicoles cruzados. c) Imagen de la secuencia aumentada, donde aparece las Láminas 2, 3, 4 con nicoles paralelos. d) (c) con nicoles cruzados.

Se hicieron análisis de Rayos X en sedimentos de la planicie para confirmar la identidad de diversos componentes que se encuentran presentes en los cortes (Fig. 4.31a). El método utilizado fue de roca total y para analizar las muestras en el difractómetro de la UNS se las colocaron finamente pulverizadas en el aparato de 3 a 60° (2θ) con escaneo por pasos (Fig. 4.31b). Se analizaron muestras de sedimento de las dos estaciones de varias profundidades con texturas y colores diferentes. Los muestreos se realizaron bajo lupa estereoscópica debido al espesor milimétrico de algunos niveles.

Los resultados que se obtuvieron a partir de la roca total fue la presencia de diversos minerales que luego se confirmaron con análisis de petrografía y microscopio electrónico de barrido. En los difractogramas se puede apreciar la presencia de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasas, halita, calcita, yeso, pirita, magnetita. Los resultados no se pudieron correlacionar con las secciones delgadas petrográficas.

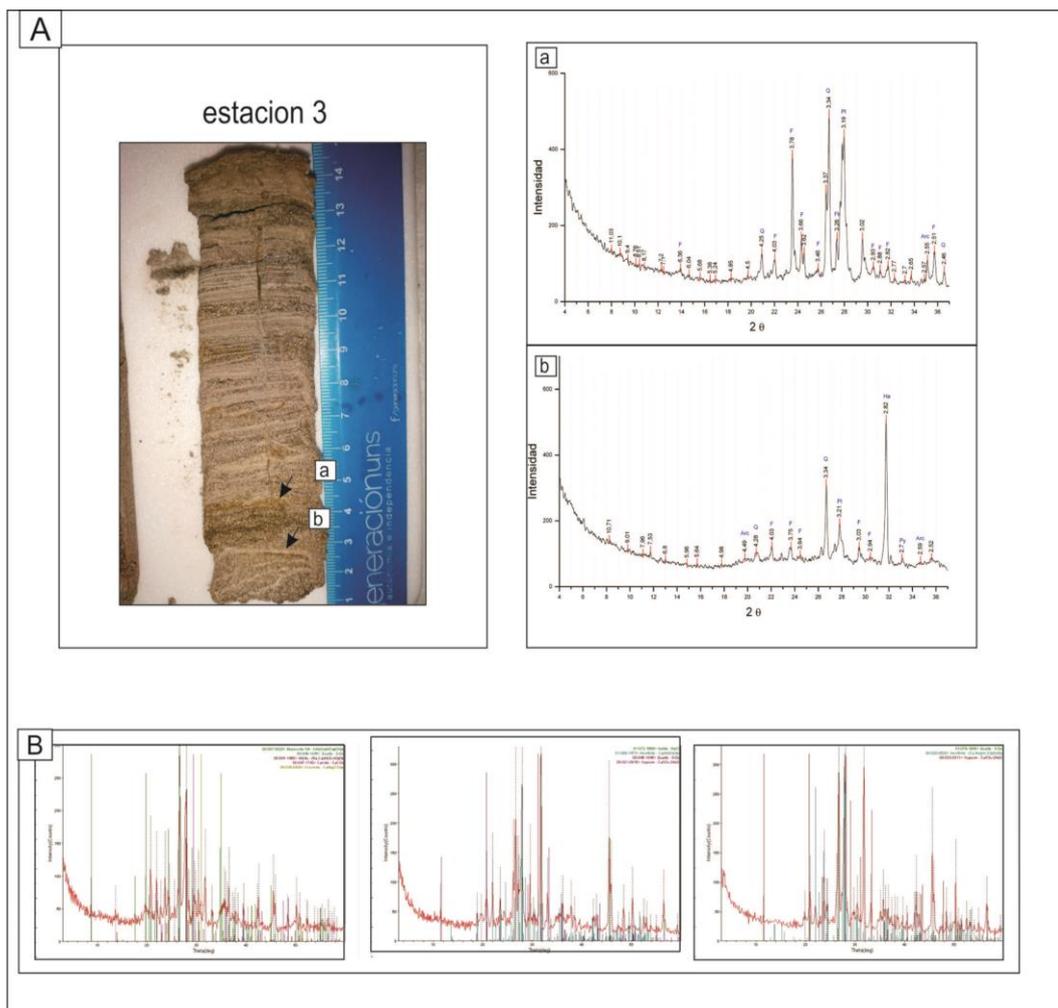


Figura 4.31. Análisis de Rayos X en roca total de sedimentos de la planicie. a) Ejemplo de la muestra extraída del testigo para el análisis de rayos X. b) Difractogramas donde se destaca la presencia de halita, yeso y calcita.

4.5. Análisis con Microscopio Electrónico de barrido (MEB) y Sistema de Microanálisis de rayos X por Energía Dispersiva (MEB- EDAX)

Estos análisis permitieron reconocer la interacción entre microorganismos y granos de sedimento, junto con la relación espacial tal como se presentan en las matas microbianas (Fig. 4.32). El análisis de MEB-EDS permitió caracterizar la química elemental de las muestras. Se logró determinar minerales precipitados como el CaCO_3 en láminas perfectamente definidas (Fig. 4.33a, b), y se pudo confirmar la presencia de filamentos de cianobacterias que atraviesan las láminas de CaCO_3 de manera sub-vertical (Fig. 4.33c, d), como se había observado en análisis petrográficos previos.

Esta metodología además permitió observar que la textura del carbonato es micrítica con granos menores a 4 μm . Los mapeos de la superficie en forma lineal (Linescan) permitieron definir la compleja relación de láminas de arcillas, cianobacterias y precipitados (CaCO_3). En este último caso, los picos de Ca, O y C son coincidentes, indicando que se trata de CaCO_3 (Fig. 4.33e). Los carbonatos están identificados por C, donde este elemento tiene sólo un pico en el registro (entre 100 y 110 μm). Por otro lado, los resultados de la tinción de carbonatos mediante el método rojo de Alizarina permitieron corroborar el precipitado carbonático como calcita (Fig. 4.33f).

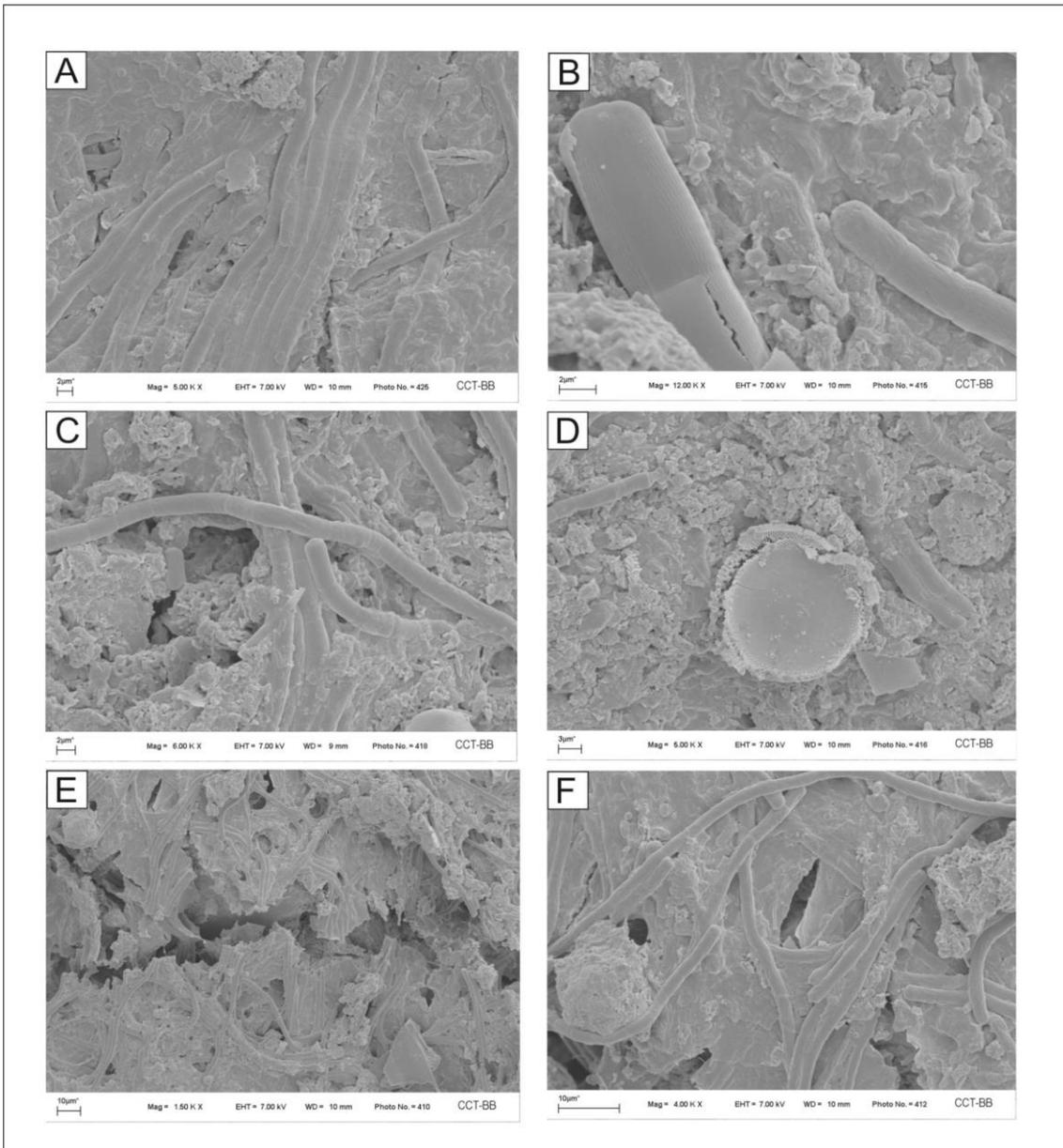


Figura 4.32. Micrografías realizadas con microscopio electrónico de barrido que permite observar la interacción entre sedimentos, precipitados y microorganismos en la planicie de marea. a) Filamentos de cianobacterias. b) Fragmento de diatomea junto con un filamento de cianobacteria. c) Filamentos de cianobacterias y la interacción con el sedimento. d) Fragmentos de microorganismos. Diatomea céntrica. e) Grieta en el sedimento donde intervienen numerosos filamentos de cianobacterias. f) Fragmentos de cianobacterias envolviendo grano de sedimento.

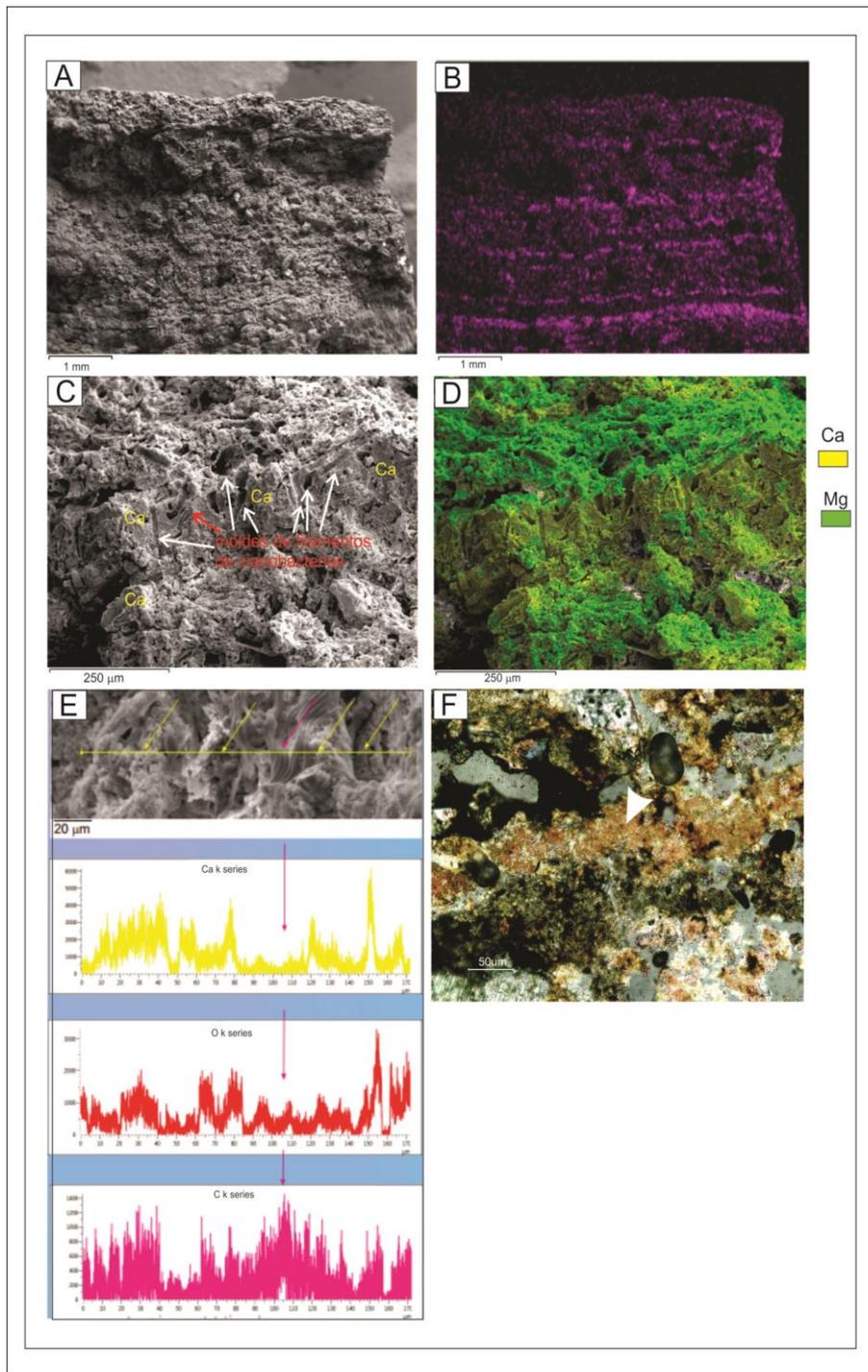


Figura 4.33. a) Micrografía (vista panorámica) que permite observar la biolaminación del sedimento de la planicie. b) Mapeo de la micrografía que se observa en (a) mostrando capas de calcio presente en el sedimento. c) Micrografía del sedimento donde se reconoce la presencia de calcio que se encuentra en forma de carbonato en capas de 100 a 200 μm . d) Mapeo de la micrografía (c) donde se distinguen capas de composición cálcica y magnésica. e) Mapeo de la superficie en forma lineal (Linescan). f) Imagen tomada con el microscopio petrográfico. Flecha: CaCO_3 luego de la tinción.

4.6. Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana

Las matas microbianas se desarrollan en la planicie presentan un espesor de ~ 1 cm, separándose relativamente fácil del sedimento subyacente. Estas presentan una flexibilidad y cohesividad excepcionales fundamentalmente en condiciones de humedad que permiten desarrollar numerosas estructuras sedimentarias microbianas frente a agentes erosivos. La St3 presentó numerosas estructuras de deformación, mezcladas entre sí, difícil de encontrar un patrón de formación (Fig. 4.34a, b, c). Mientras, durante el período de observación, la St4 presentó mayormente una superficie microbiana plana donde muy pocas estructuras estuvieron presentes (Fig. 4.34d, e, f).

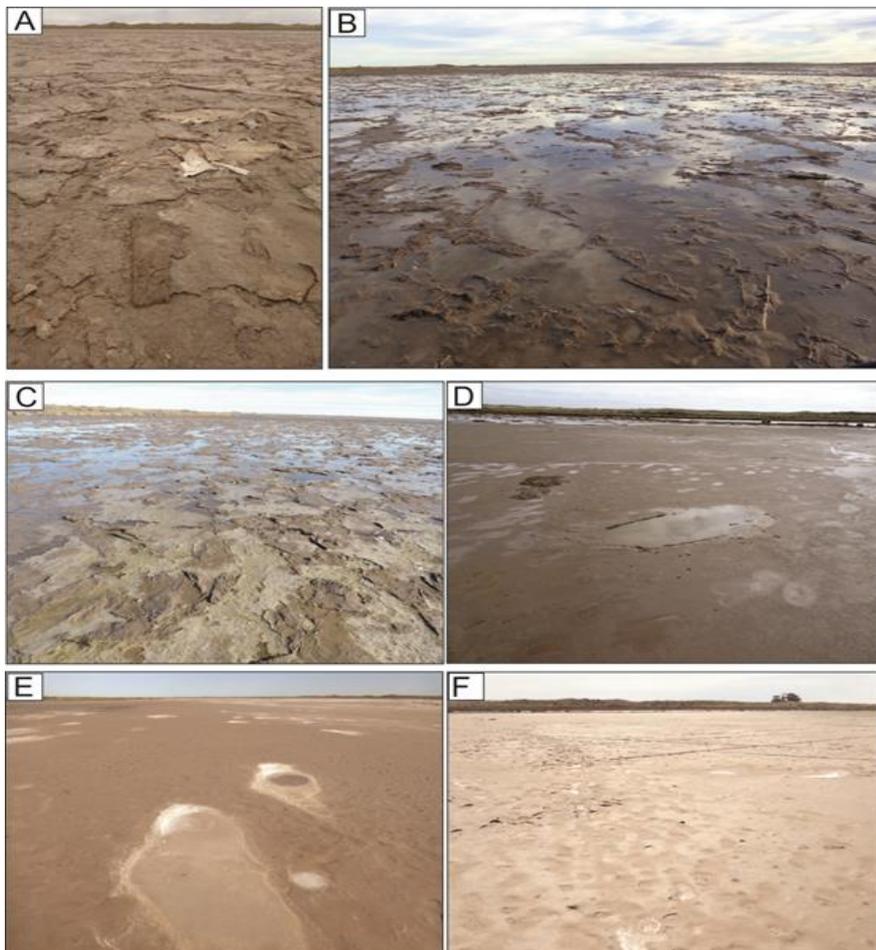


Figura 4.34. Fotografías de la planicie de Paso Seco. a-c) Fotografías de St3 donde se observan numerosas estructuras sedimentarias de deformación, mezcladas entre sí, sin un patrón determinado d-f) Fotografías de St4, la cual presenta una superficie mayormente plana.

4.6.1. Grietas de desecación

Durante los meses estivales la mata microbiana queda expuesta por tiempo prolongado a la radiación solar, causando la pérdida de humedad de la mata y posterior agrietamiento (Fig. 4.35). Las grietas que se desarrollan en el sedimento colonizado por microorganismos generalmente presentan bordes irregulares a sinoidales, donde en un mismo lugar pueden desarrollarse grietas de diferente tamaño que no llegan a formar polígonos cerrados (Fig. 4.35a). Los márgenes de las grietas en matas microbianas, a diferencia de las grietas de contracción, suelen ser irregulares (Fig. 4.35a, b). También se puede observar que en un mismo sector puede haber zonas con gran densidad de grietas y zonas donde las grietas se encuentren más espaciadas (Fig. 4.35b). En algunos casos, a medida que la grieta va perdiendo humedad, los bordes se curvan levemente hacia arriba y el sedimento infrayacente queda expuesto (Fig. 4.35b, c).



Figura 4.35. Fotografía donde se observa el desarrollo de grietas de desecación sobre la planicie. a) Planicie en época estival donde se observa la mata microbiana agrietada, con bordes irregulares la cual no llega a formar polígonos cerrados. b) Bordes de las grietas irregulares, donde el sedimento infrayacente conserva la humedad. c) Grietas de desecación que perdieron humedad. Se observa los bordes curvándose levemente hacia arriba.

4.6.2. Domos de mata

Este tipo de estructura presenta forma circular en planta y se forman cuando se acumulan los gases entre la mata microbiana y el sedimento infrayacente. Esto demuestra la gran flexibilidad de la mata ya que se deforma pero no se desgarran (Fig. 4.36a). La mata microbiana deformada tiene un espesor de ~1 cm. El diámetro de los domos es variable, donde se pueden encontrar tamaños entre 1 y 4,5 cm (Fig. 4.36b) y otros entre 5 y 18 cm (n=50).

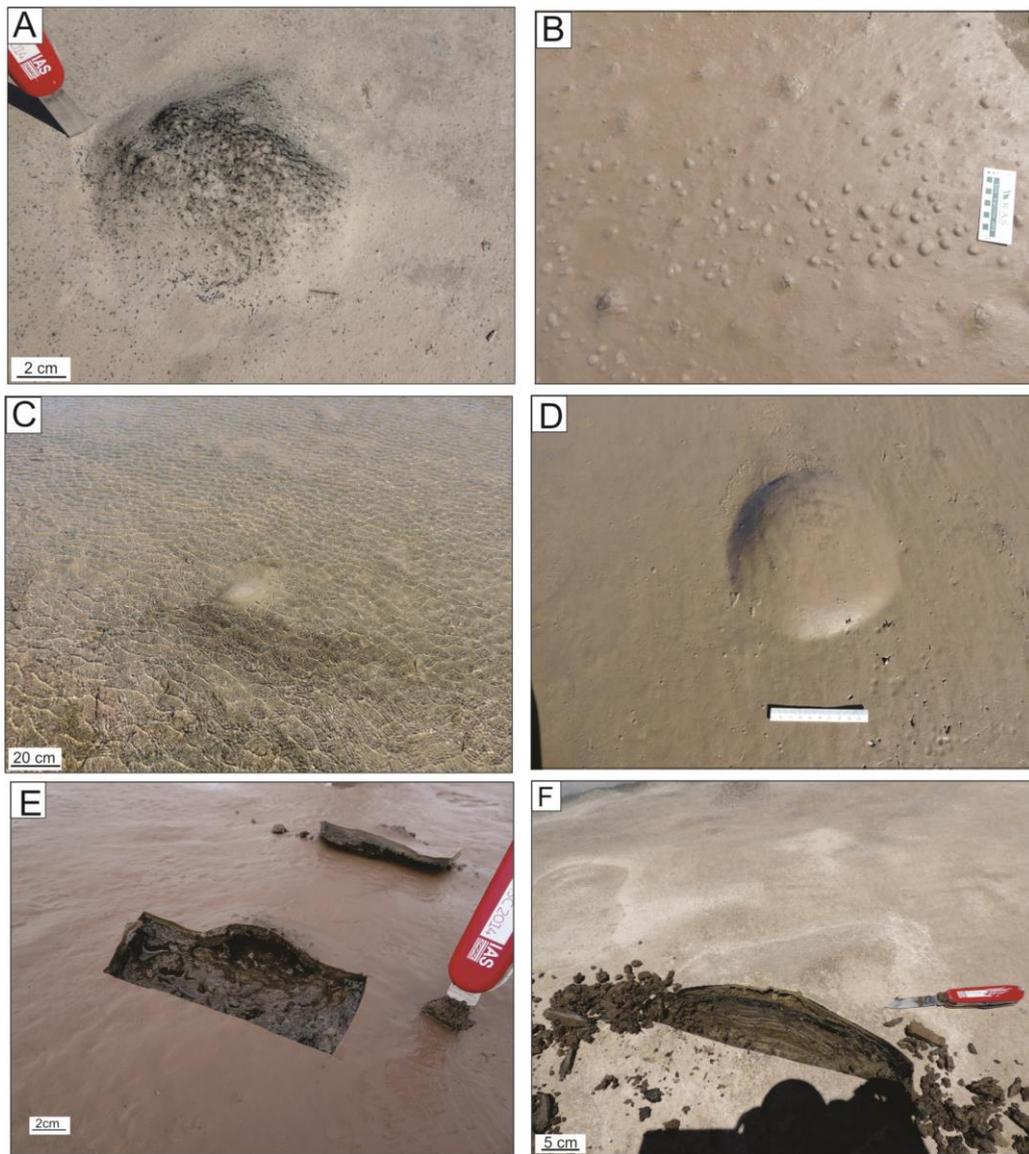


Figura 4.36. Domo de mata microbiana. a) Mata microbiana de gran flexibilidad formando una estructura de domo, sin desgarros. b) Planicie de Paso Seco donde se desarrollan pequeñas estructuras en domos de diámetro menor a 5 cm. c) Domo microbiano durante una inundación, el cual se asoma sobre la superficie del agua. d) Domo microbiano sobre la planicie húmeda. e) Corte transversal de una estructura de domo. Se puede apreciar la cavidad que forma la mata microbiana al separarse del sedimento infrayacente. f) Corte transversal de domo microbiano. Se destaca la deformación del sedimento infrayacente, tomando la misma forma de la

Es frecuente encontrar este tipo de estructuras luego de las inundaciones donde pueden identificarse con facilidad en remanentes de agua sobre la planicie ya que éstas se asoman sobre la superficie del agua (Fig. 4.36c). Por otro lado, durante los períodos secos los domos generalmente mantienen su forma (Fig. 4.36d). Las mayores dimensiones de los domos se han observado mientras se encuentran sumergidos y fundamentalmente se desarrollan en la St4 (cerca del mar) en coincidencia con mayor cantidad de

sedimento arenoso subyacente. A través de un corte vertical de la estructura, se puede encontrar una oquedad entre la mata superficial y el sedimento infrayacente (Fig. 4.36e), aunque en otras ocasiones, el perfil puede mostrar el sedimento subyacente con la misma forma convexa de la mata superficial (Fig. 4.36f).

4.6.3. Fragmentos de mata

Estas estructuras son trozos de mata microbiana que han sido erosionados de la superficie de la planicie y transportados de su lugar de origen. Se encuentran dispersos sobre la planicie y pueden presentar diferentes formas y tamaños de hasta 2 m de longitud (Fig. 4.37a). De acuerdo al tamaño se las divide en dos grupos. Los grandes fragmentos desde los 10 cm hasta 2 m de longitud, y los pequeños fragmentos de menor escala, <10 cm (Fig. 4.37b). Esta estructura puede ser desplazada varios metros de su lugar de origen fundamentalmente por las corrientes de agua, tal como se observa en la

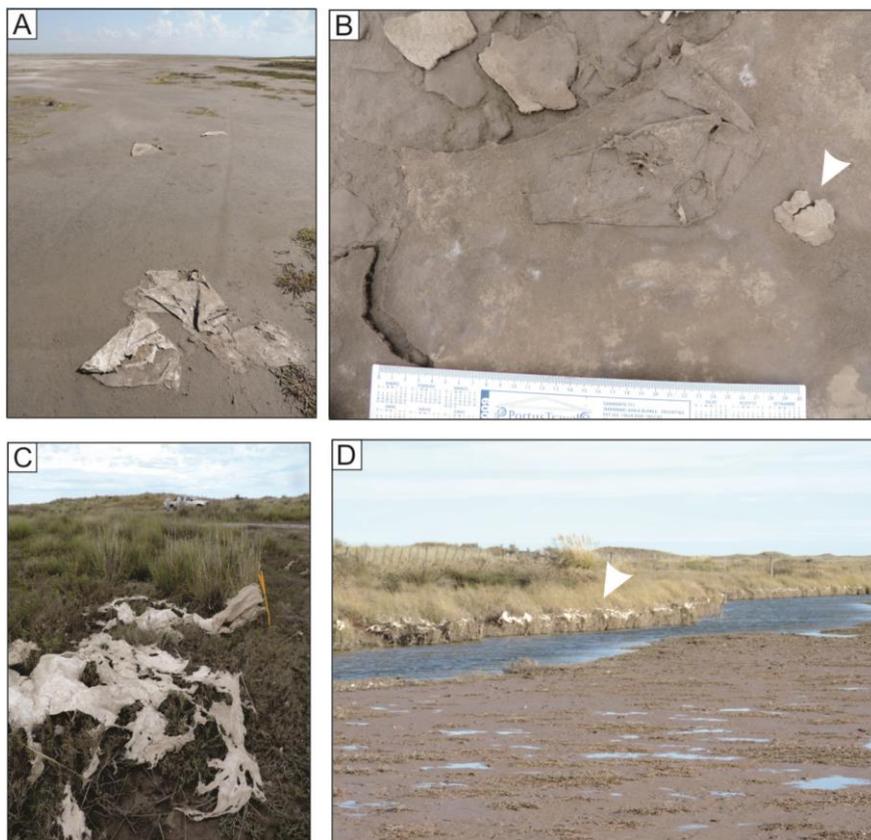


Figura 4.37. Fragmentos de mata microbiana. a) Fragmento presentando dobleces y pliegues. b) Se observa un pequeño fragmento (flecha). c) Fragmento de mata microbiana el cual fue roto durante su transporte y depositado en los bordes del área de estudio. d) Fragmentos de mata depositados en un mismo nivel sobre la vegetación indicando la altura que alcanzó el agua durante una inundación previa (flecha).

figura 4.37c donde luego de una inundación un gran fragmento de mata fue transportado hasta ser depositado sobre la vegetación de los bordes del área de estudio.

Durante la campaña realizada el mes de octubre de 2015 pudo identificarse fragmentos de mata hasta en un mismo nivel en la vegetación de los bordes del área, relacionándolos con el nivel que alcanzó el agua durante una inundación previa (Fig. 4.37d). En otra oportunidad, durante la campaña en que se presencié la inundación, se pudo identificar pequeños fragmentos de mata transportados por la corriente de agua.

4.6.4. Superficie de desgarrado de mata

Estas estructuras están formadas por erosión de una porción de mata microbiana, en general rectangular, que se ha desgarrado y separado del sedimento infrayacente

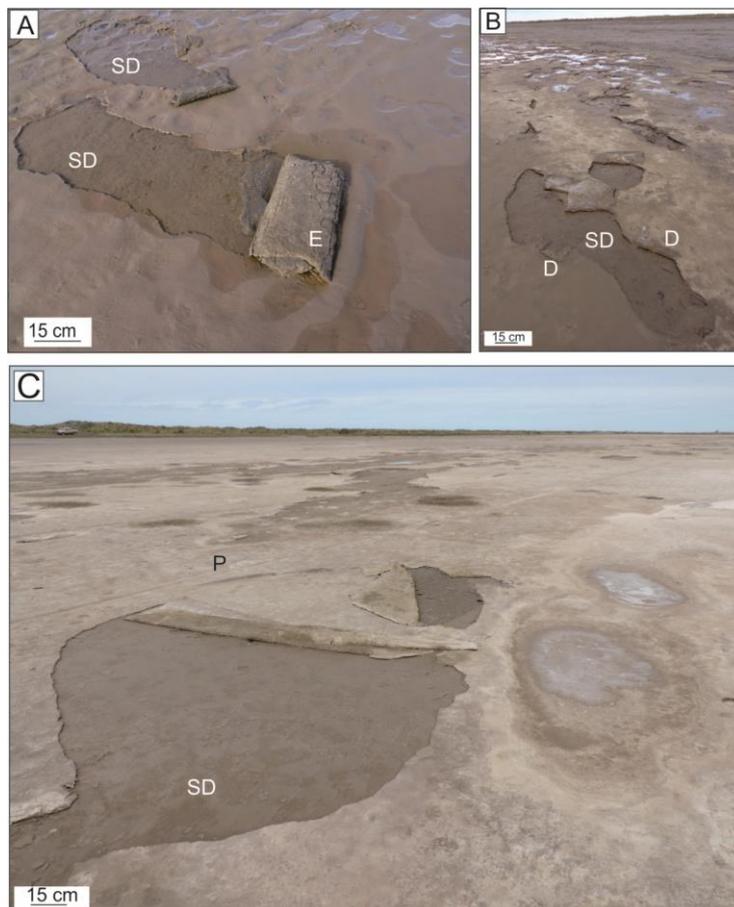


Figura 4.38. Estructura de superficie de desgarrado. a) Dos superficies de desgarrado (SD) las cuales en un extremo se encuentran asociadas a un enrollamiento (E) indicando la dirección que tuvo el desgarrado. b) Superficie de desgarrado asociada a estructura en doblez (D). c) Superficie de desgarrado asociado a un pliegue de mata de mata microbiana (P).

generando en la planicie formas elongadas desprovistas de la mata superficial. La estructura puede presentar varios metros de longitud y generalmente está asociada a estructuras de enrollamiento en su extremo (Fig. 4.38a). También se encuentran asociadas a dobleces hacia los costados y pliegues (Fig. 4.38b, c). Las superficies de desgarramiento contienen en la superficie parte del sedimento subyacente que generalmente exhibe matas microbianas antiguas.

4.6.5. Dobleces de mata microbiana

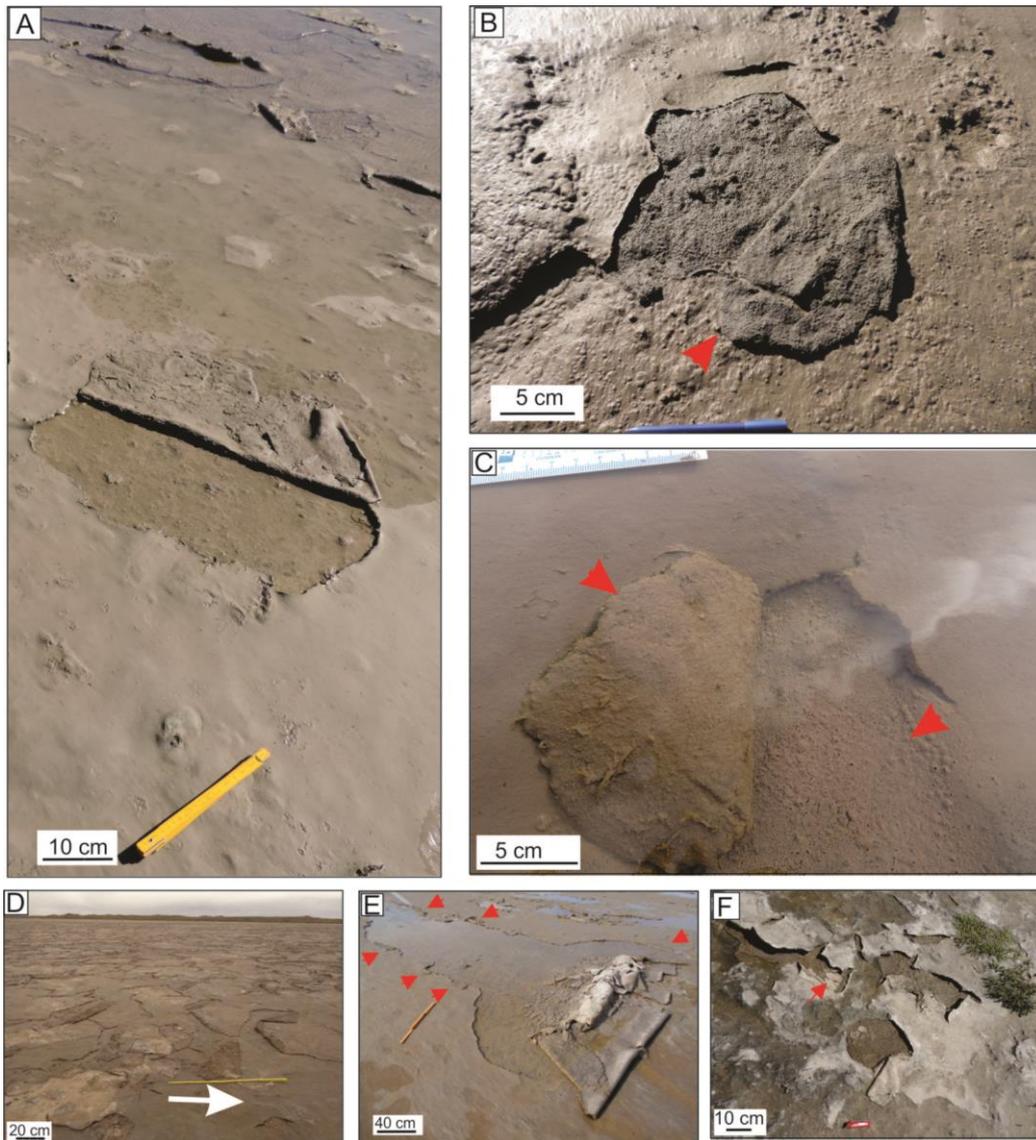


Figura 4.39. Dobleces de mata microbiana. a) Porción de mata superficial que se separa del sedimento infrayacente. b) Diferente coloración del sedimento subyacente. c) Estructura en doblez debajo de una Lámina de agua, donde se observa recolonización incipiente en las dos superficies generadas y expuestas por la estructura (flechas). d) Dobleces desarrollados en una dirección dominante coincidiendo con el reflujó (flecha). e) Estructuras en doblez asociados a bordes de desgarramiento. f) Dobleces de mata microbiana asociados a grietas de desecación.

Esta estructura está compuesta por una porción de la mata microbiana superficial que se separa parcialmente de la mata microbiana, ya que queda unida por una arista. Esta porción rota 180° hasta depositarse nuevamente sobre la mata microbiana (Fig. 4.39a). La formación de estas estructuras está relacionada a un comportamiento cohesivo de la mata microbiana. Cuando se forman los dobleces, el sedimento infrayacente queda expuesto generando superficies susceptibles de ser recolonizadas en condiciones de humedad (Fig. 4.39b, c). El largo del doblez es variable, y se midieron en promedio ~ 39 cm y un ancho de ~ 11 cm (n=20). La dirección de los dobleces también es variable, sin embargo hay sectores determinados que denotan una dirección dominante. En un sector cercano al arroyo de marea sobre el borde sur del área de estudio, cerca de la St3, los dobleces se desarrollaron en dirección al mar (Fig. 4.39d).

Este tipo de estructuras pueden estar asociados a otras estructuras de erosión, como las estructuras de desgarró. Se midieron dobleces (n=30) en los bordes del desgarró en dos direcciones determinadas, formando ángulos menores a 90° con respecto a la longitud máxima del desgarró (Fig. 4.39e). Por otro lado, pueden encontrarse en los bordes de las grietas de desecación (Fig. 4.39f).

4.6.6. Remanente de mata microbiana y bolsillos de erosión

Los bolsillos de erosión son depresiones elongadas o redondeadas con bordes agudos inmediatamente luego de su formación (Fig. 4.40a) o graduales luego de un

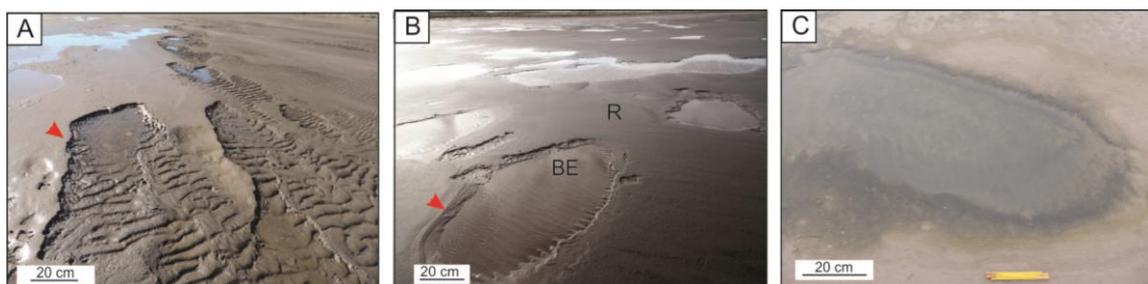


Figura 4.40. Remanente de mata microbiana y bolsillos de erosión. a) Bolsillo de erosión sobre la planicie de Paso Seco. La depresión se presenta con bordes agudos (flecha) y se observa desarrollo de ondulitas en el sedimento que ha quedado expuesto. b) Bolsillo de erosión (BE) con ondulitas en la superficie, donde los bordes de la depresión son graduales (flecha). El remanente de mata microbiana (R) se observa sin deformaciones. c) Bolsillo de erosión con recolonización incipiente.

tiempo de su formación (Fig. 4.40b) y generalmente se desarrollan en los bordes laterales del área de estudio donde los sedimentos están menos colonizados en profundidad. Las depresiones se forman por erosión de mata microbiana superficial, y el sedimento

que queda expuesto y poco bioestabilizado forma ondulitas (Fig. 4.40b). Por otro lado, los remanentes de mata son las superficies no erosionadas que quedan luego de la formación de los bolsillos de erosión (R en Fig. 4.40b).

4.6.7. Pliegues de mata microbiana

Al deslizarse la mata superficial sobre el sedimento subyacente saturado en agua se pueden formar pliegues de mata microbiana (Fig. 4.41a). La longitud de los pliegues depende del tamaño del fragmento de mata que fue deslizado y del esfuerzo que le dio origen (Fig. 4.41b). El plano axial del pliegue formado se dispone perpendicular a la planicie, aunque otros forman un ángulo agudo con la superficie sedimentaria, los que se denominan pliegues de mata microbiana recumbentes (Fig. 4.41c). El eje del plano axial de los pliegues no presenta una dirección determinada sobre la planicie, sino que se encuentran distribuidos en forma aleatoria. Estas estructuras de deformación generalmente se encuentran asociados a un desgarro de la mata microbiana (Fig. 4.41d). El espesor de la mata microbiana plegada varía entre 0.5 a 1 cm y en ocasiones se puede observar que el plegamiento mantiene la biolaminación característica de las matas microbianas, conservando las láminas óxicas (superiores) y anóxicas (inferiores) (Fig. 4.41e). Es interesante destacar que en algunos casos, dentro de estas estructuras se encuentra sedimento infrayacente con la misma forma que el pliegue de mata, compuesto por tamaño arena y recubierto por sedimento pelítico (Fig. 4.41e, f).

4.6.8. Enrollamiento de mata microbiana

Esta estructura consiste en un fragmento desgarrado de mata microbiana y enrollado formando un cilindro o elipse (Fig. 4.42a). Está compuesto por una mata microbiana flexible con espesores de hasta 1 cm donde la superficie inferior del fragmento desplaza consigo sedimento infrayacente (Fig. 4.42b). Normalmente los enrollamientos describen en perfil una forma elíptica debido al peso de toda la estructura. El número de vueltas es variable y depende de la longitud y espesor de la fracción de mata, y del esfuerzo que los origina. En ocasiones se pueden encontrar dos enrollamientos aledaños formados por un mismo desgarro (Fig. 4.42c). También puede observarse un enrollamiento erosionado en su formación quedando expuesta una estructura compleja que incluye varios enrollamientos y dobleces (Fig. 4.42d).

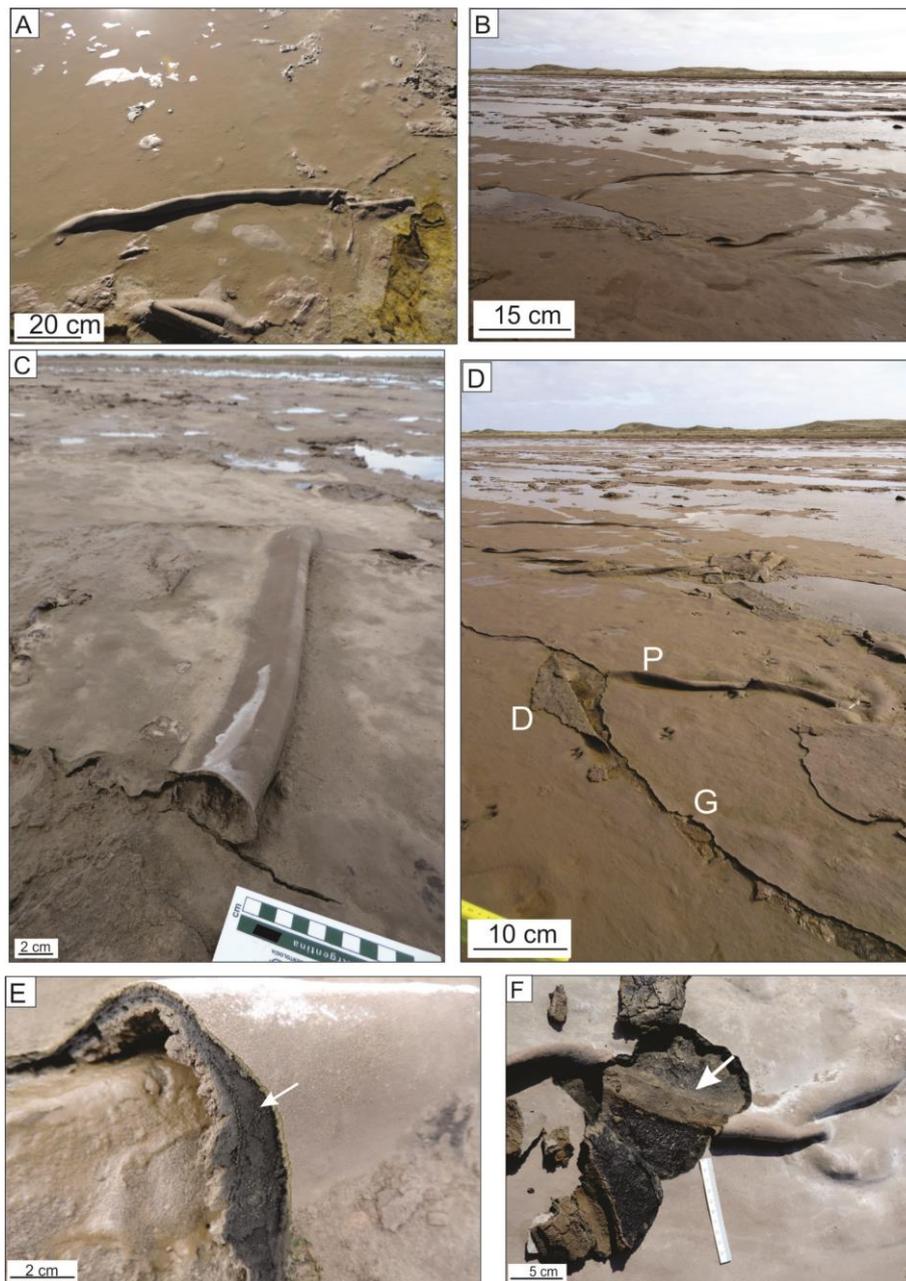


Figura 4.41. Pliegues de mata microbiana. a) Pliegue sobre sedimento saturado en agua. b) Conjunto de pliegues microbianos donde el plano axial de los pliegues se presentan casi paralelos. c) Pliegue con plano axial paralelo a la planicie (pliegue de mata microbiana recumbente). d) Pliegue microbiano (P) donde se observa la asociación con un desgarro (G) en la mata microbiana, la cual posibilita el desarrollo de la estructura plegada. Doble asociado al desgarro (D). e) Pliegue de mata microbiana, donde se observa la capa óxica y anóxica en la mata microbiana deformada (flecha). El sedimento infrayacente se encuentra deformado, tomando la forma de la mata microbiana superficial. El sedimento es de tamaño arena y recubierto por sedimento pelítico. f) Pliegue de mata superficial visto en planta. Se observa el sedimento infrayacente tomando la misma forma que la mata microbiana superficial deformada.

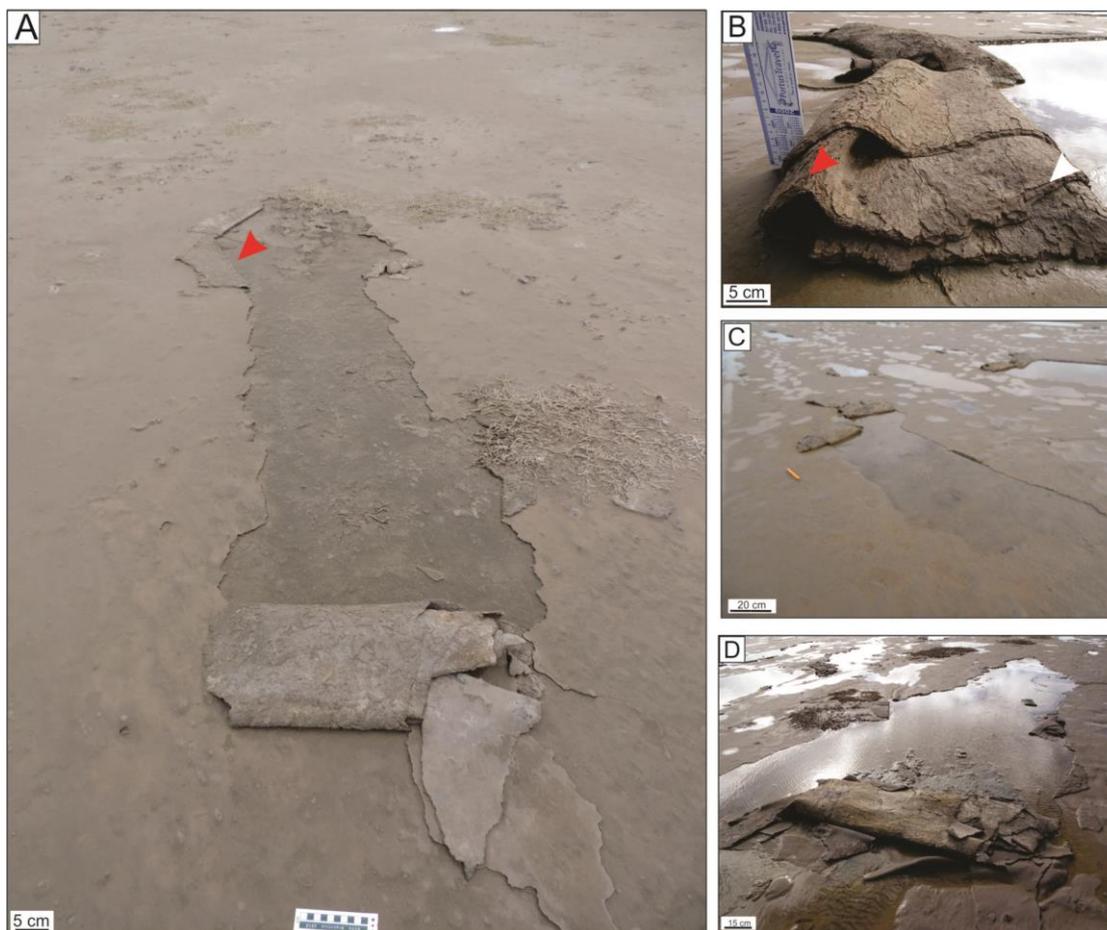


Figura 4.42. Enrollamientos de mata microbiana. a) Asociado a una superficie de desgarro y a dobleces de mata microbiana (flecha). b) Vista de perfil de la estructura enrollada. Se observa el gran espesor (1 cm) de la mata microbiana enrollada. Se destaca sedimento infrayacente adosado a la superficie inferior de la mata microbiana (flecha roja). En los bordes de la estructura se puede apreciar la biolaminación característica del sedimento de la planicie (flecha blanca). c) Par de enrollamientos producidos por la misma superficie de desgarro. Se destaca la superficie de desgarro saturada en agua. d) Estructura de enrollamiento erosionada dejando expuesta una estructura compleja.

4.7. Relación de la hidrodinámica con las estructuras microbianas de deformación

Se realizó una campaña fuera del periodo estudiado, el 25 de Junio de 2018, dos días posteriores a una severa tormenta, durante la cual el área fue inundada en tres oportunidades antes de que la columna de agua alcanzara los 0,67 m sobre la planicie (Fig. 4.43a). Posteriormente se mantuvo en 0,58 m de altura de agua durante 10 h con pequeñas variaciones de altura producto de olas; y luego del reflujó la planicie quedó sumergida en 0,05 m de agua. Durante la campaña fue posible documentar la apariencia de la

planicie mediante un VANT que permitió observar la gran extensión del comportamiento de las matas microbianas frente a este importante evento erosivo (Fig. 4.43b). Se pudieron apreciar grandes enrollamientos de matas microbianas, asociados a pliegues y dobleces luego del ingreso del agua de mar (Fig. 4.43b, c). Se identificó una gran modificación de la planicie con respecto a las observaciones realizadas previamente durante los tres años monitoreados, fundamentalmente en la St4, donde esta estación sólo presentaba algunas pocas estructuras de deformación. Sin embargo, en junio de 2018, en esta estación se registró la generación de múltiples estructuras sedimentarias de deformación de importantes dimensiones que fueron medidas para su caracterización.

En una superficie de 5500 m² se midieron 31 superficies de desgarros de mata microbiana con una longitud de hasta 8 m, paralelos al canal (Fig. 4.43d), donde en su extremo se desarrollan grandes enrollamientos de mata (Fig. 4.38a). La orientación promedio de estos desgarros fue de 200° con respecto al norte magnético (Fig. 4.43d). Esta dirección coincide con la orientación del canal. Las estructuras de doblez de mata microbiana asociados a la superficie de desgarrado se presentaron en dos poblaciones, una con dirección SO (promedio de 40° con respecto a la dirección longitudinal del desgarrado) y la otra orientación con dirección SE (promedio de 60° con respecto a la dirección longitudinal del desgarrado) (Fig. 4.43e). Los desgarros permiten que la mata microbiana superficial se deslice sobre el sedimento subyacente generando pliegues a poca distancia del desgarrado (flecha blanca, Fig. 4.43e).

Por otro lado se midieron un total de 30 enrollamientos en la misma superficie, los cuales presentaron en promedio un ancho de 32 cm, una longitud de 61 cm y un alto de 13 cm. La orientación de estos enrollamientos presentaron un ángulo de 206° con respecto al norte magnético coincidiendo con la dirección longitudinal del canal y sentido del flujo de la corriente (Fig. 4.43f). Algunos enrollamientos actuaron como obstáculo para depositar pequeños fragmentos de mata erosionados de la planicie superficial o de las matas subyacentes (Fig. 4.43g). También se observaron grandes bolsillos de erosión de formas redondeadas y alargadas de diferentes tamaños (entre 3 y 8 m de largo) fundamentalmente en los bordes del canal (Fig. 4.43h). Se realizaron mediciones de la dirección de los bolsillos alargados (n=20) los cuales coincidieron con la dirección del canal de marea (200° con respecto al norte magnético). Al momento de la erosión, los bordes de las estructuras se presentan con pendientes abruptas que luego de las siguientes inundaciones éstos son suavizados y colonizados (Fig. 4.40c).

Es importante mencionar que todas las estructuras de desgarros y posteriormente enrolladas coinciden con la dirección del flujo, en concordancia con el eje del canal. Los pliegues y dobleces presentan direcciones variables aunque relacionados con la corriente de flujo que generaron desgarros de mata (Fig. 4.43i). Con respecto a los bolsillos de erosión, no presentan orientación. Sin embargo la mayor elongación de la estructura coincide con el eje del canal de marea.

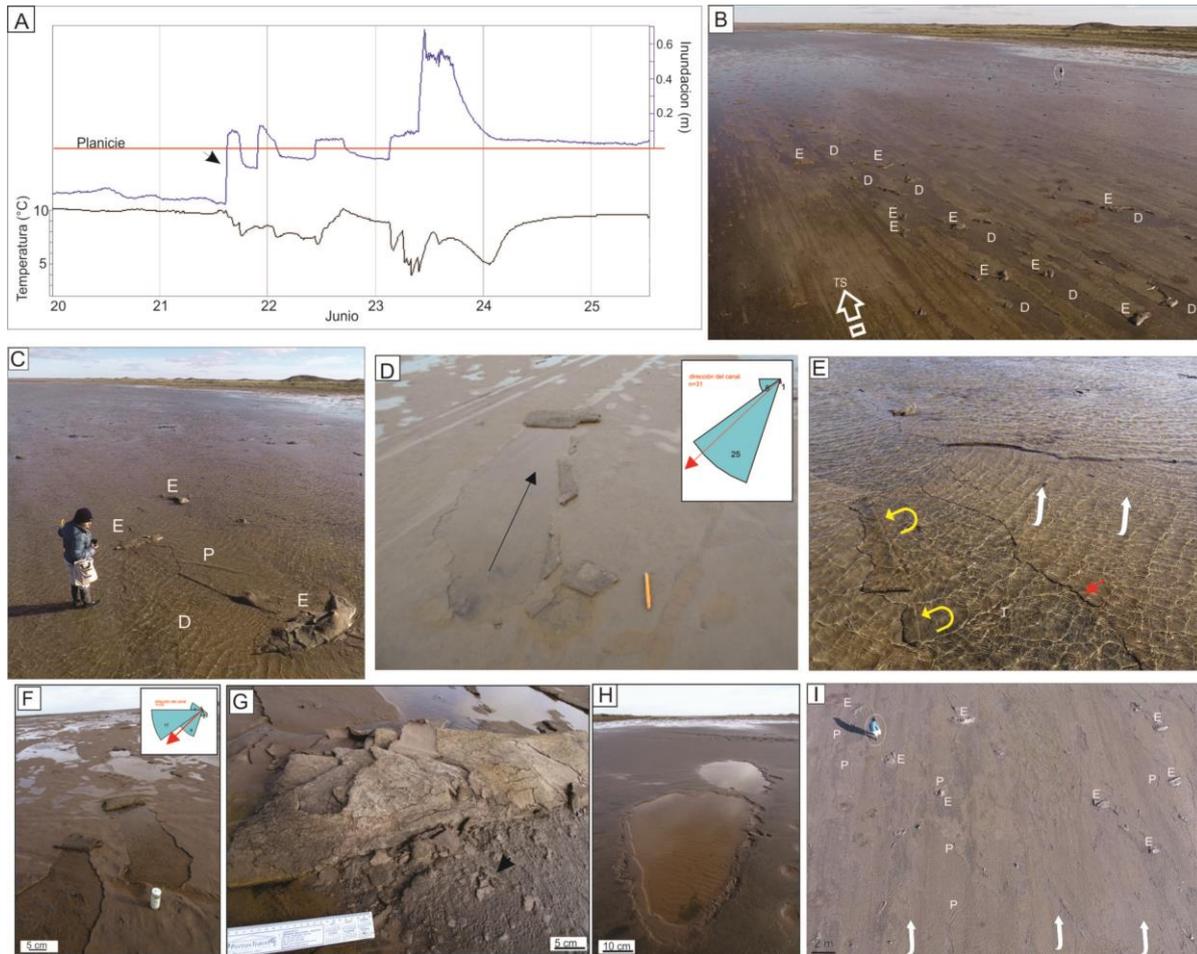


Figura 4.43. a) Nivel y temperatura del agua registrada en la planicie de Paso Seco durante el mes de Junio de 2018, cinco días antes de la campaña. b) Imagen obtenida mediante el VANT donde se identifican estructuras de deformación. Superficies de desgarró (D), enrollamientos de matas microbianas (E). Se muestra la dirección del evento erosivo (flecha) provocando transporte de sedimento (TP). c) Imagen obtenida mediante el VANT donde se observa enrollamientos de mata microbiana (E), pliegue de mata microbiana (P), Superficies de desgarró (D). d) Diagrama de rosas indicando la frecuencia y dirección de superficies de desgarró. Se señala la dirección del canal de San Blas (flecha roja) en coincidencia con la dirección del desgarró. e) Superficie de desgarró de mata microbiana asociadas a pliegues (flecha blanca) y dobleces de mata microbiana (flecha amarilla). Se observan bordes netos en el límite de la superficie de desgarró (flecha roja). f) Diagrama de rosas de 30 estructuras de enrollamiento de mata microbiana con respecto al norte magnético. Se indica la dirección del canal de marea (flecha roja). g) Enrollamiento microbiano asociado a fragmentos de mata microbiana (flecha negra). h) Bolsillos de erosión alargados generalmente ubicados en los bordes del canal. i) Imagen obtenida del VANT donde se observan estructuras de deformación direccionales coincidiendo con la dirección del flujo (flechas): enrollamientos de mata microbiana (E), pliegues de mata microbiana (P).

4.8. Recolonización

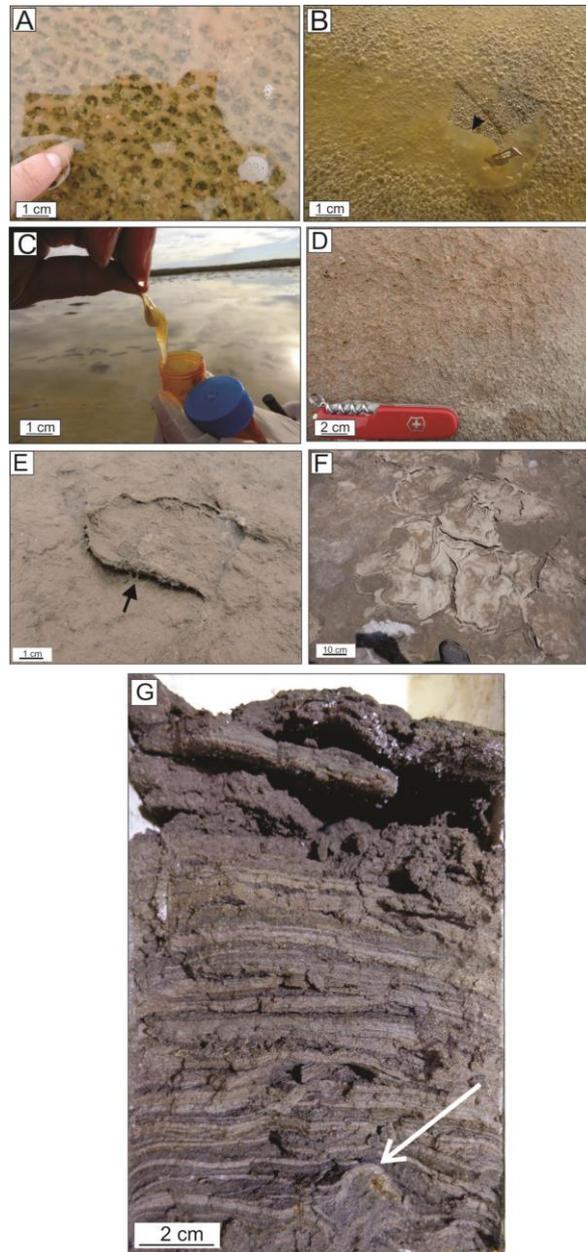


Figura 4.44. Recolonización. a) Biofilm de color pardo amarillento desarrollado en el fondo de una depresión en la planicie de Paso Seco. Se observa un enrejado y por debajo las cianobacterias de color verde. b) Biofilm gelatinoso removido (flecha) que atrapa gran cantidad de burbujas. c) Detalle del biofilm gelatinoso que cubre la superficie (b). d) Retículas desarrolladas en las depresiones sobre la planicie. e) Doblez de mata microbiana donde se identifica la formación de retículas en los bordes de la estructura (flecha). f) Grietas de desecación rellenas por consecuencia de la recolonización. g) Testigo de sedimento formando biolaminitas. Se observan matas microbianas antiguas a 10 cm de profundidad.

La recolonización de los microorganismos, entendida como la reactivación de su actividad con la posibilidad de generar una nueva lámina microbiana, se evidencia en la planicie fundamentalmente luego de una inundación. Durante el período estudiado, se registraron algunos cuerpos de agua efímeros, donde en el fondo de la depresión se desarrollaba un *biofilm* de color claro (Fig. 4.44a, b, c). Por debajo del *biofilm* se pudo observar la presencia de burbujas de 1 a 3 mm de diámetro, siendo producto de la actividad fotosintética (Fig. 4.44b). En ocasiones, este *biofilm* se expone en forma de enrejado, el cual permite observar las cianobacterias (verdes) por debajo, producto de la reactivación microbiana (Fig. 4.44a). En los bordes de las depresiones sin agua, aunque con presencia de humedad, se desarrollan retículas sobre la superficie (Fig. 4.44d). Al mismo tiempo, estas retículas se observaron en los bordes de las estructuras de deformación, como en los bordes de un doblez como etapa inicial de la nivelación de la superficie microbiana (Fig. 4.44e).

Otro ejemplo de recolonización puede observarse en los bordes de las grietas de desecación, donde el sedimento mantiene la humedad y la actividad microbiana rellena las grietas (Fig. 4.44f). La recolonización puede llegar a identificarse también en testigos verticales donde se observa la secuencia de laminación de las matas microbianas, donde las más nuevas están en la superficie (Fig. 4.44g). En el testigo se identificaron matas microbianas deformadas a 10 cm de profundidad.

CAPITULO 5

5.DISCUSIÓN

5.1. Por qué es importante identificar la presencia de actividad microbiana en el sedimento?

Durante mucho tiempo la presencia de microorganismos en los sedimentos ha pasado inadvertida ya que algunas texturas generadas por su actividad son similares a las formadas exclusivamente por procesos físicos. Una de las más relevantes es la laminación presentada por sedimento fino en alternancia con sedimento grueso en el registro fósil, la cual es interpretada como fluctuaciones de la energía. En los ambientes costeros, como las planicies de marea, es frecuente la formación de estructuras heterolíticas que responden a la acumulación de arena relacionadas con corrientes de marea y posterior depositación de material fino en suspensión cuando la corriente cesa (Cuadrado y Blasi, 2018). Sin embargo, la laminación también es una característica resultante de la actividad microbiana en sedimentos supramareales. En tal sentido, Schieber (1999) indica que los sedimentos laminados producidos por la actividad microbiana pueden considerarse la "huella" que refleja la interacción de la comunidad de la mata microbiana con el medio ambiente.

En general se estudian los ambientes fósiles del Proterozoico porque es el mejor lugar para identificar láminas producidas por actividad microbiana, ya que la biósfera en ese estadio de la Tierra estaba dominada exclusivamente por microorganismos. En ausencia de restos conservados de organismos formadores de matas microbianas, los cambios que éstas causan en el comportamiento de los sedimentos proporcionan los mejores indicadores de la colonización de la superficie microbiana. Entre estos indicadores, Schieber (1999) menciona a los parches de ondulación, o bolsillos de erosión (como los denomina Noffke, 2010), que se deben a la erosión diferencial del sedimento superficial colonizado. Schieber (1999) también destaca la naturaleza cohesiva de las

matas microbianas que conduce a la formación de dobleces, fragmentos plegados y enrollados, así como láminas con alto grado de pendiente y estructuras en domos. Por otro lado, la descomposición de la mata microbiana puede llevar a una mineralización diagenética temprana de dolomita, pirita y siderita. Cuando esta mineralización sigue láminas o capas individuales de sedimento, o si está claramente asociada con características deformadas, contorsionadas o curvadas en rocas, debe sospecharse la presencia de capas microbianas (Schieber, 1999).

Los sedimentos colonizados cambian sus propiedades físicas generando mayor cohesividad y resistencia frente a un aumento de las condiciones hidrodinámicas. Así lo demuestran mediciones de estabilidad de sedimentos en matas microbianas por la acción de corrientes y olas, en relación con el diagrama de Shield's, donde los sedimentos colonizados requieren mayor energía para ser transportados (Noffke, 2010; Cuadrado *et al.*, 2014). Hagadorn y McDowell (2012) por otra parte, demostraron en el laboratorio que las comunidades de microorganismos que crecen sobre el sedimento arenoso aumentan el esfuerzo de corte requerido para desarrollar erosión (50% a 100% de aumento) según lo establecido en el diagrama de Hjulstrøm para sedimentos estériles. Estos resultados indican que las matas modifican el umbral de erosión, aumentando el esfuerzo tangencial necesario para erosionar la superficie sedimentaria (Andersen y Pejrup, 2011).

Por ello, es imprescindible estudiar con detalle las sucesiones sedimentarias donde se sospeche que la actividad microbiana puede estar presente con el fin de aceptar o rechazar la hipótesis de la presencia de microorganismos en los sedimentos. Este análisis previo permitirá interpretar correctamente las condiciones dinámicas del ambiente, ya que la omisión de la presencia de microorganismos en los sedimentos puede conducir a una interpretación equivocada. Si el sedimento está colonizado, el ambiente de formación podría ser de mayor energía del que reflejan los sedimentos por sí mismos.

Son pocos los casos donde hay evidencias directas de colonización del sedimento por microorganismos con el reconocimiento de filamentos en rocas sedimentarias (Knoll, 2003; Tice y Lowe, 2004). En el caso de no contar con determinaciones concluyentes se necesita un conjunto de indicadores para fortalecer la presunción de actividad microbiana. Al estudiar el registro fósil se pueden encontrar algunas estructuras cuya génesis es difícil de explicar sin tener en cuenta la presencia de microorganismos, como es el caso de la flexibilidad de los estratos. Diferentes estructuras microbianas se generan a partir de la colonización de los sedimentos y su interacción con la hidrodinámica.

Los estudios en el ambiente actual permiten reconocer el proceso de formación de las estructuras sedimentarias de deformación donde los microorganismos tienen un rol preponderante. Con la observación y medición de los procesos físicos y químicos se pueden caracterizar y conocer la vinculación que existe entre los procesos biológicos y sedimentológicos.

5.2. Sedimento colonizado por matas microbianas de Paso Seco

La planicie de Paso Seco se observa nivelada y lisa, salvo en los lugares donde se desarrollan las estructuras microbianas de deformación. El sedimento de la planicie está compuesto por minerales silicoclásticos entre ellos cuarzo, feldespato, plagioclasa con tamaños medios entre limo y arena fina (Maisano *et al.*, 2016). En los testigos verticales de la planicie se pueden observar diferentes generaciones de matas microbianas presentadas en forma de láminas continuas de 40 a 50 μm de espesor, una sobre otra hasta la superficie donde se encuentra la mata actual (viva). Intercaladas a estas láminas se encuentran niveles de material clástico compuesto por arena fina con espesores de mm a varios cm, y el conjunto de láminas orgánicas y clásticas toman el nombre de biolaminitas (Gerdes *et al.*, 2000).

Comparando las dos estaciones muestreadas, la St4 generalmente presenta mayor espesor en las láminas hasta llegar a formar capas de arena con espesores > 1 cm (Fig. 5.1). Al mismo tiempo, en algunos de estos niveles arenosos se observa una textura porosa donde los poros presentan un diámetro de 0,1 a 0,3 cm en St4 (Fig. 5.1a). Los poros pueden ser generados por gases como consecuencia del decaimiento de la materia orgánica compuestos por H_2S , H_2 , CO , CO_2 y CH_4 , entre otros (Noffke, 2010). La mayor proporción de arena que presenta la St4 en comparación a la St3 se puede atribuir a la cercanía a la espiga de arena, donde las corrientes de flujo transportan sedimentos arenosos y lo depositan por detrás de la espiga. Por el contrario, las láminas o capas de arena en St3, si bien están presentes, son de menor espesor (no superan los 1,5 cm) y no poseen fábrica porosa. Además, las láminas de material orgánico (matas microbianas) en St3 son más frecuentes y de mayor espesor ($\sim 0,5$ cm) que en la St4 que está correlacionado con una mayor frecuencia de inundación (Fig. 5.1).

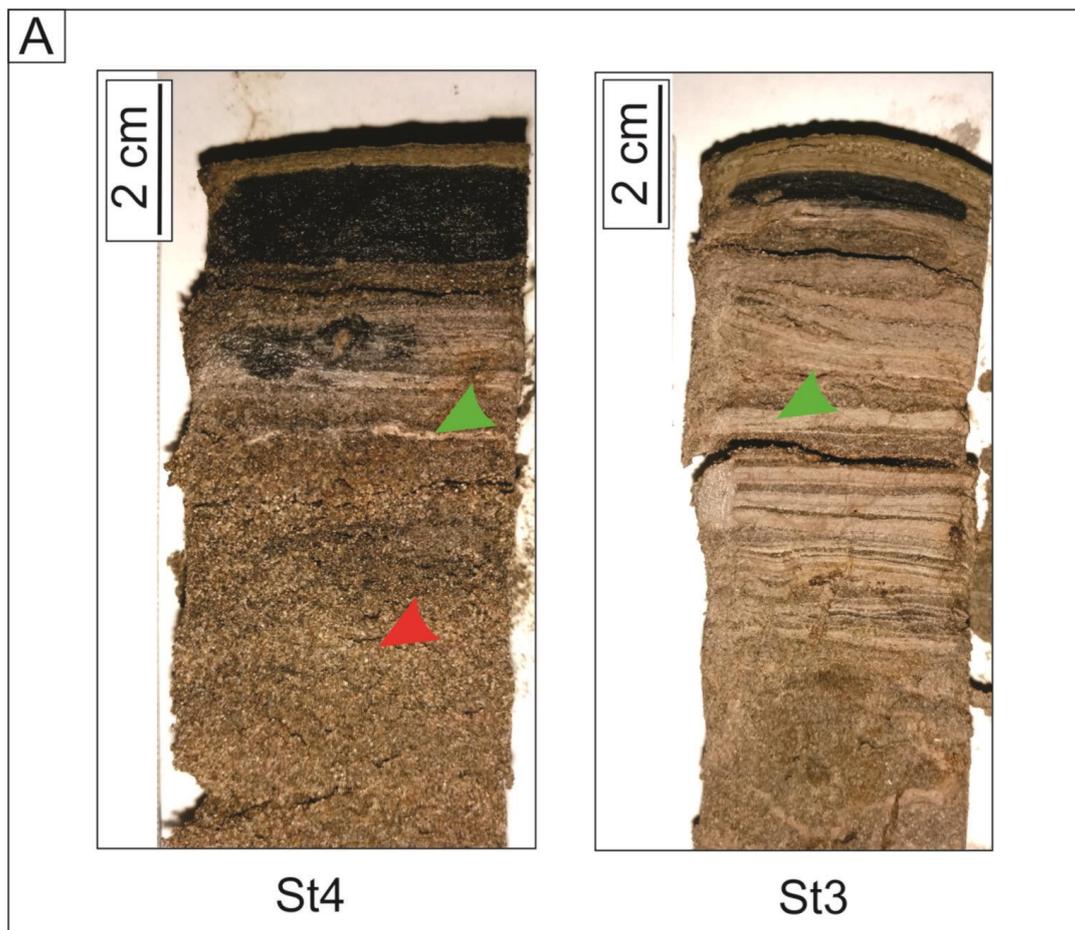


Figura 5.1. Testigos de sedimento de la planicie de Paso Seco. Se observa la diferencia entre las dos estaciones en cuanto a la frecuencia de matas microbianas (Flecha verde: nivel de mata microbiana; flecha roja: nivel arenoso).

La capa superficial de mata microbiana presenta mayor humedad y materia orgánica en ambas estaciones (Fig. 4.24 y 4.26). Esto responde a la presencia de mata microbiana viva y fisiológicamente activa en la superficie en comparación con el sedimento infrayacente. Asimismo, la St3 posee mayor porcentaje de humedad y materia orgánica que la St4 debido a la mayor densidad de matas microbianas.

5.3. Formación de matas epibentónicas

Todos los ambientes acuáticos son susceptibles de ser colonizados por microorganismos (Noffke, 2013). En primer lugar, el desarrollo de los microorganismos en el sedimento comienza con la formación de un *biofilm*, lo cual es posible siempre que existan moléculas de agua en el entorno. El *biofilm* es una cubierta orgánica que se

desarrolla sobre los granos de sedimento (Decho, 2000a) y está compuesto por organismos unicelulares (procariotas y eucariotas) junto con las SPE que generan. Luego de su desarrollo y bajo condiciones favorables, el *biofilm* puede crecer hasta lograr que todas las partículas del sedimento queden embebidas por las SPE formando una capa lateralmente continua. Las matas microbianas son comunidades laminadas complejas con un alto nivel de organización. Generalmente las laminaciones se pueden apreciar en cortes transversales, y su desarrollo se encuentra condicionado por la cantidad y calidad de la luz (Dupraz *et al.*, 2009). Son capas orgánicas densas, en algunos casos mayores a 1 cm de espesor que se encuentran cubriendo la superficie sedimentaria en numerosos ambientes (Visscher y Stolz, 2005; Stal, 2012). Entre los ambientes clásticos típicos donde pueden desarrollarse estas alfombras, se encuentran las planicies de marea (Gerdes y Krumbein, 1987). En este ambiente, las matas microbianas están compuestas mayoritariamente por cianobacterias y pueden cubrir una gran superficie. Es importante recalcar que para que la mata microbiana se desarrolle son necesarias condiciones hidráulicas tranquilas, donde la erosión y la deposición sean casi nulas (ventana hidráulica de desarrollo de mata microbiana, Noffke *et al.*, 2002).

El tipo de mata que se desarrolla en un ambiente depende de varios parámetros, entre ellos: composición del sustrato, régimen hidrodinámico, clima, disponibilidad de luz y nutrientes. De acuerdo a la variabilidad lateral que puede desarrollarse en algunos ambientes, Noffke (2010) postuló el término “cadena de *biofilm*”, donde el *biofilm* y las matas microbianas forman una sucesión lateral dependiendo del relieve topográfico (submareal, intermareal y supramareal) y las condiciones hidrodinámicas del lugar. En cada nivel se desarrollan determinadas especies de cianobacterias que logran la mejor adaptación con respecto a las condiciones hidrodinámicas. Para los ambientes de planicie de marea se realizaron estudios en 30 sitios diferentes donde todos coincidieron con tres tipos de asociaciones (Noffke, 2010): en la zona intermareal baja se desarrolla el *biofilm*, en la zona intermareal alta se desarrollan las matas endobentónicas y en la zona supramareal (definida como la zona inundada en sicigia o durante las tormentas) se desarrollan las matas epibentónicas (Noffke, 2003a,c; Noffke y Krumbein, 1999), dependiendo fundamentalmente del tiempo que el sustrato colonizado se encuentre sumergido.

El término de matas epibentónicas se utiliza para las matas microbianas que se desarrollan en la superficie del sedimento y pueden desarrollar espesores de hasta 1,5

cm. El microorganismo más abundante en este tipo de matas microbianas es la cianobacteria *Microcoleus chthonoplastes*, que se caracteriza por secretar grandes cantidades de SPE. Las SPE en el área supramareal es importante por muchos motivos, entre ellos contribuye a la eficiencia de la actividad metabólica de la comunidad microbiana (Neu, 1994), y por otro lado constituye una barrera hidrófoba en la mata microbiana superficial, aportando estabilidad y cohesión al sedimento. Al mismo tiempo brinda resistencia a la erosión y/o resuspensión (Underwood y Paterson, 2003) causados por corrientes de agua. Otro de los motivos es que las SPE protege a los microorganismos contra los bruscos cambios en la presión osmótica causados por la gran variabilidad en la salinidad. Tal sería el caso en que luego de una semana donde la planicie estuvo expuesta a altos niveles de radiación solar y elevada evaporación, con altos valores de salinidad, una importante precipitación puede disminuir estos valores rápidamente (en minutos) (Noffke, 2010).

A través de las observaciones realizadas bajo microscopio, el sedimento colonizado de Paso Seco muestra gran densidad de filamentos de cianobacterias junto con las SPE. A través de un corte vertical del sedimento, se encuentra una abundancia de granos, los cuales tienden a ser envueltos por las SPE, impidiendo el contacto entre ellos lo que provoca que floten independientemente en la matriz orgánica. Los minerales de cuarzo presentes en la mata ayuda a transmitir la luz a mayores profundidades generando mayor espesor de la mata microbiana ya que los microorganismos ubicados a mm de distancia de la superficie se encuentran con la luz necesaria para llevar a cabo la actividad fotosintética (Noffke, 2010).

El antiguo canal de marea de Paso Seco es actualmente una planicie de marea cubierta por matas microbianas epibentónicas, típicas de ambientes supramareales donde el área es inundada de forma intermitente. Cuadrado *et al.* (2015) reconocieron que las matas microbianas desarrolladas en esta área están compuestas por cianobacterias del orden Oscillatoria: *Microcoleus chthonoplastes* y *Symploca*, y diatomeas bentónicas, céntricas (*Melosira* sp. y *Podosira* sp.) y penadas (género *Narvocoloide*, y *Nitzschia* sp). Durante los periodos de exposición de la planicie es posible el desarrollo de una capa superficial continua, coherente y homogénea de mata microbiana, donde la abundancia de SPE ayuda a la fijación del sedimento.

5.4. La hidrodinámica en relación con la superficie microbiana

Durante condiciones de tormenta, en sicigia, con vientos fuertes del SO, y olas que superan los 2 m, el nivel del mar sobrepasa la espiga costera y el antiguo canal es inundado por agua de mar ingresando por un angosto cauce a la zona estudiada (Fig. 4.1). En el momento de marea creciente, la fuerza del agua al ingresar genera una fuerte fricción sobre la mata microbiana superficial, siendo uno de los principales agentes erosivos para la formación de las estructuras de deformación.

Es importante destacar que el flujo ingresa con mayor velocidad que el reflujó (Fig. 4.5) y en pocas horas se alcanza la máxima columna de agua sobre la planicie (0.65 m en 3 h; Fig. 4.43a). Por el contrario, la corriente de reflujó tiene una velocidad menor, favorecida por la baja pendiente. La última fracción de agua es retenida por mayor tiempo en la zona ya que la espiga genera una barrera topográfica baja por donde el reflujó solo fluye por un canal estrecho. Por consiguiente esta zona forma una cuenca afectada por condiciones ambientales estacionales muy marcadas.

Durante el invierno, el agua retenida en la cuenca mantiene una lámina de agua en la superficie microbiana favorecida por el alto nivel de la capa freática, cerca de la superficie (Fig. 4.2). En algunos casos la zona puede permanecer inundada por 25 días consecutivos, proceso que brinda a las SPE la capacidad de comportarse elásticamente, permitiendo a la mata microbiana estirarse y retraerse, generando un cierto grado de flexibilidad. Ello le otorga capacidad de resistir a fuerzas externas como las corrientes de agua (Decho y Gutierrez, 2017). Durante los meses estivales, la mata microbiana superficial se encuentra expuesta a radiación solar por varios días consecutivos. En este período se desarrolla mayor evaporación y al mismo tiempo aumenta la salinidad (Fig. 4.4). Como consecuencia del aumento de la salinidad, las SPE en algunos casos puede condensarse e incluso formar una barrera hidrófuga protegiendo a la mata microbiana de la desecación (Decho y Gutierrez, 2017). Es interesante destacar que cuando la radiación solar comienza a aumentar (fines del período invernal), el nivel freático alcanza hasta 40 cm de profundidad.

Luego del reflujó, el agua de mar remanente es retenida en depresiones formadas sobre la planicie, debido a la baja permeabilidad de las matas microbianas (Fig. 5.2a). A medida que aumenta la radiación solar, y favorecida por los fuertes

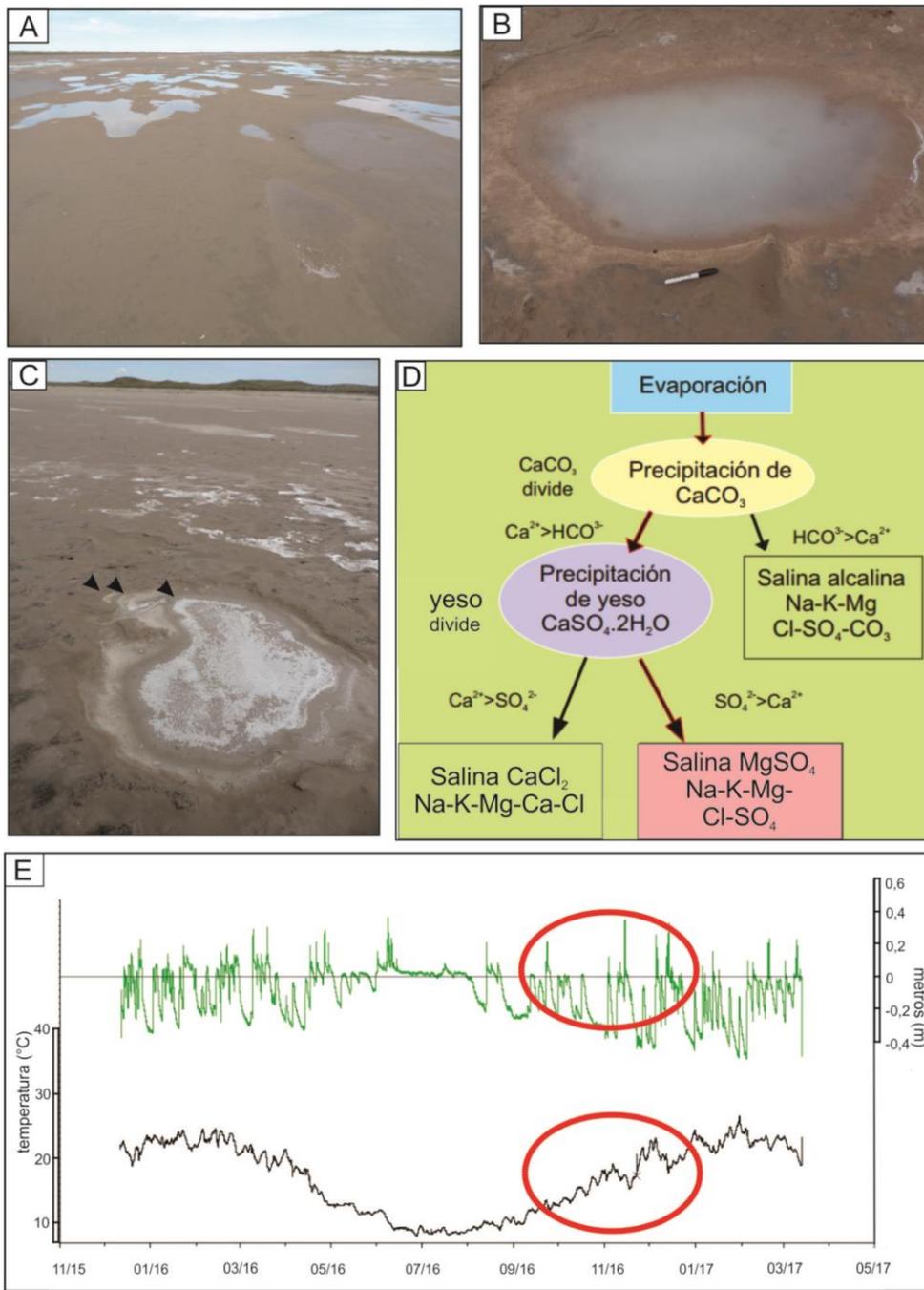


Figura 5.2. a) Planicie de Paso Seco donde se observa agua retenida en depresiones. b) El agua retenida empieza el proceso de evaporación. c) Mientras la evaporación en las depresiones avanza, la concentración de sales aumenta, se lleva a cabo la precipitación de minerales evaporíticos el cual se observa en los diferentes halos formados alrededor de la depresión (flechas). d) Evolución de la evaporación en la planicie (Lowenstein *et al.*, 2003). e) Registro del nivel de agua de Paso Seco durante el año 2016, se destaca como disminuye el nivel durante los meses estivales dejando expuesta la planicie.

vientos de la zona, se produce la evaporación del agua de mar, precipitando las sales evaporíticas de CaCO_3 , CaSO_4 y NaCl (Fig. 5.2b, c, d). Se constituye entonces en una cuenca salina durante la época estival (Fig. 5.2e).

Comparando los registros de nivel de agua de ambas estaciones, se observó que el sector de la planicie más interior, donde se ubica la St3, tiene mayor frecuencia de inundaciones. Esta estación, al estar localizada en el interior del antiguo canal, recibe inundaciones desde los dos extremos E y O: desde el mar (al E), coincidiendo con las inundaciones en la St4, y desde el arroyo de marea que corta a la planicie en cercanía de la St3 (al O, Fig. 5.3). Si bien las inundaciones que se desarrollan simultáneamente en las dos estaciones provienen desde el mar cuando la altura de ola supera los 2 m, los picos desarrollados exclusivamente en la St3 coinciden con vientos fuertes, superiores a 30 km h^{-1} que provienen generalmente del cuadrante NO. Por tal motivo, la St3 se encuentra expuesta a mayor frecuencia de inundaciones que la St4. Ésta puede ser la causa por la cual la planicie de la St3 presente más laminaciones de matas microbianas en comparación con las observadas en la St4 (Fig. 5.1).



Figura 5.3. Fotografía extraída mediante el VANT de la planicie de Paso Seco. Se observa el curso del arroyo de marea cerca de la St3. Al fondo se aprecia el mar, separado del área de estudio por la espiga vegetada. A manera de escala se señalan personas sobre la planicie (círculos).

5.5. Proceso de generación de estructuras sedimentarias de deformación

Para que se establezca una mata microbiana en la superficie sedimentaria es imprescindible un ambiente de baja energía, pero una vez formadas, el sedimento puede resistir eventos de mayor energía sin erosionarse, p.e. fuertes tormentas (Cuadrado *et al.*, 2013). Sin embargo, al sobrepasar el umbral de erosión y debido a la gran flexibilidad que poseen las matas microbianas (por el abundante contenido de SPE), éstas se desgarran y deforman generando estructuras sedimentarias microbianas de deformación. Se consideran tres etapas para la formación de dichas estructuras.

5.5.1. Etapa 1: Colonización del sedimento por matas microbianas

El sedimento colonizado por los microorganismos formando matas microbianas epibentónicas y expuesto a corrientes de agua puede resistir velocidades de hasta 1,6 m/s sin erosionarse, esto es 9 veces más de lo que resiste un sedimento no colonizado (Noffke, 2010). Esta resistencia es posible debido a la bioestabilización, donde las SPE junto con los filamentos de cianobacterias aglutinan el sedimento, generando una superficie suave y resbaladiza en la superficie de la mata microbiana, reduciendo de este modo la fricción provocada por la corriente (Paterson, 1994) (Fig. 5.4a). Las matas microbianas interactúan con la dinámica de la corriente de agua generando varias estructuras de erosión y deformación como respuesta.

5.5.2. Etapa 2: Procesos físicos

Con el ingreso de agua de mar, el nivel de agua subyacente se eleva y por consiguiente el aire de los poros del sedimento se desplaza hacia la superficie. La mata microbiana epibentónica superficial, extensa y gruesa es impermeable y posee gran flexibilidad al estar húmeda. El aire desplazado hacia arriba por el ascenso del nivel del agua debajo de la planicie separa la mata superficial del sedimento infrayacente y luego deforma la mata, formando la estructura de domo microbiano. Es común observar la parte superior de domos de mata sobresaliendo de la superficie del agua, mientras la planicie queda inundada con 10 a 20 cm de agua (Fig. 4.36a).

El inicio de la formación de las estructuras sedimentarias de erosión y posterior deformación generalmente se ve favorecido por una debilidad de la mata microbiana donde actúa el esfuerzo tangencial del agua. Los factores que producen dicha debilidad son múltiples. Entre ellos se encuentran las grietas de desecación sobre la planicie cuando queda expuesta a la radiación solar (Fig. 4.35a), la pisada de algún animal que debilita la capa superficial de la mata microbiana (Fig. 5.4b), o la vegetación en la planicie que actúa como obstáculo de la corriente (Fig. 4.37d).

En la campaña del día 20 de Abril de 2015 durante la cual se presencié la inundación del área de estudio, se logró documentar la separación de un fragmento de mata superficial del sedimento infrayacente a causa de una corriente moderada (velocidad

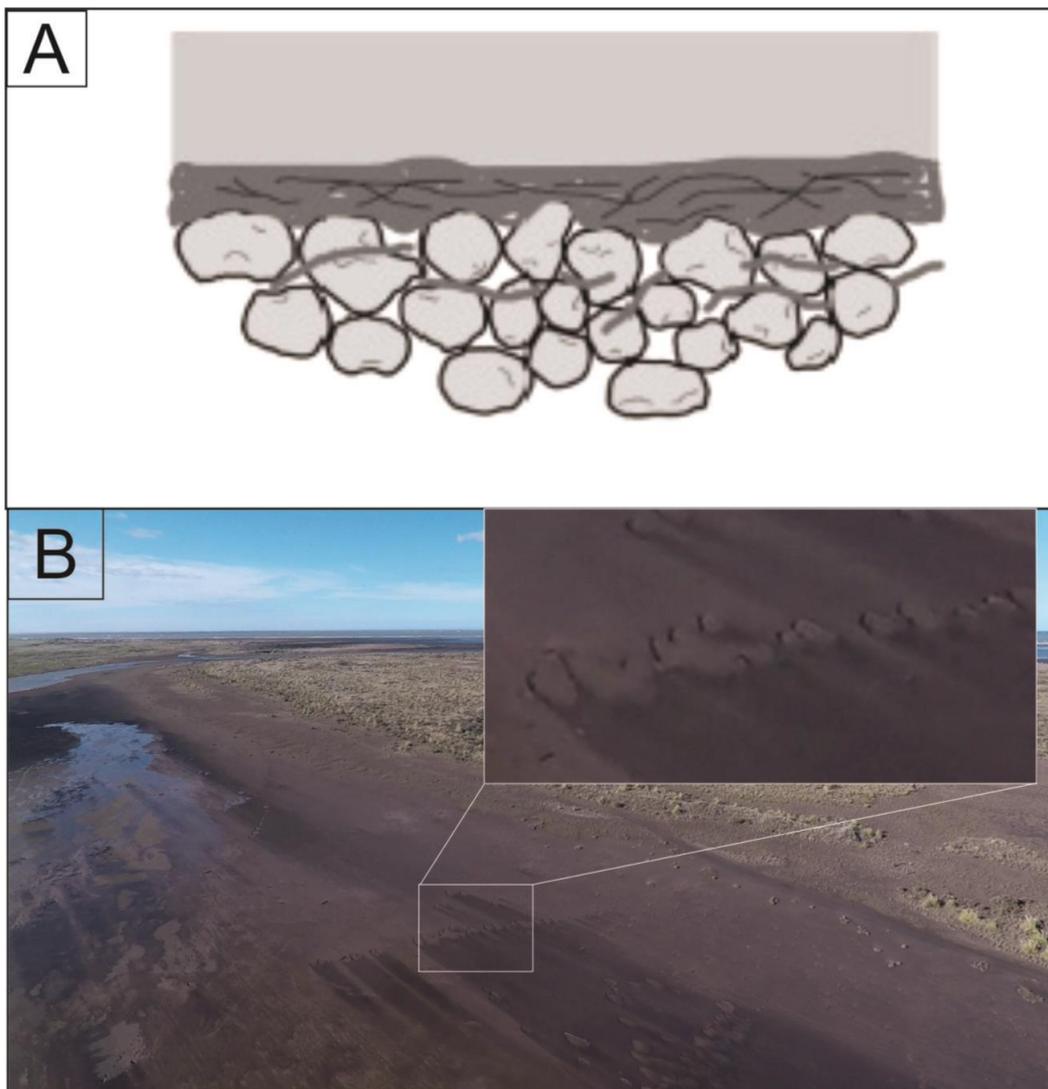


Figura 5.4. a) Proceso de bioestabilización de las matas microbianas epibentónicas (extraído de Noffke, 2010). b) Fotografía de la planicie obtenida mediante el VANT donde se observan las pisadas de un animal (posiblemente jabalí) que desencadenaron el transporte de sedimento (color oscuro) por las corrientes de flujo.

superficial de $\sim 0,5$ m/s medida en campo) que ingresaba al área. La corriente despegó con facilidad la mata microbiana del sedimento infrayacente incorporando agua entre la mata y el sedimento subyacente. Al mismo tiempo se documentó el transporte de pequeños fragmentos de mata por la corriente de flujo.

Frente a una corriente de agua, la mata microbiana reacciona de forma flexible, la cual puede deformarse hasta un límite, en el cual la mata se rompe y se erosiona parte de la superficie, generando bolsillos de erosión (Noffke, 2010). Las zonas donde permanece la mata microbiana se denominan “remanente”. En ese momento, el sedimento infrayacente queda expuesto a la erosión causada por la corriente de agua, donde los granos son desplazados por la turbulencia, y en muchas ocasiones presentan ondulitas. Los bolsillos de erosión expuestos a numerosas inundaciones pueden aumentar su tamaño generando al mismo tiempo, fragmentos de matas pequeños desde los bordes de la estructura, los cuales se distribuyen de manera aleatoria sobre toda la planicie (Noffke *et al.*, 1996; Noffke, 1999). También, con las sucesivas inundaciones se puede recolonizar los bordes, reemplazando el desnivel abrupto por bordes suavizados (Fig. 4.44f).

Fuera del período estudiado, el 23 de junio de 2018 se registró el ingreso de agua durante una tormenta, donde el nivel llegó a 0,65 m sobre la planicie (la máxima altura registrada hasta el momento), y permaneció durante 3 horas sobre la planicie (Fig. 4.43a). La gran energía que recibió el ambiente en dicha ocasión se puede inferir en base al poco tiempo (1,5 h) que demoró en llegar a la altura máxima de inundación. La tormenta que provocó la inundación generó alturas de olas estimadas en 4.1 m en mar adentro (registro de WindGuru). Dos días después de la inundación se pudo verificar la generación y asociación de múltiples estructuras microbianas deformadas fundamentalmente en la St4.

Se observaron numerosos desgarros en dirección del flujo, con longitudes del desplazamiento mayores a 6 m, finalizando en un enrollamiento de importantes dimensiones (32 cm de ancho, 13 cm de alto y 61 cm de longitud) (Fig. 4.43b). Al mismo tiempo sobre ambos bordes laterales de los desgarros se identificaron dobleces de mata (Fig. 4.43d, e) con dimensiones variables. Las disposiciones de todas las estructuras de erosión y deformación junto con sus magnitudes fueron reconocidas y documentadas con un VANT en gran parte del área de estudio. Este aparato, permitió además reconocer largas fisuras de las matas microbianas (alcanzando 10 m de longitud) que permitieron el deslizamiento de grandes extensiones de fragmentos de mata microbiana superficial sobre los sedimentos subyacentes formando estructuras plegadas a varios metros de

distancia de la fisura (Fig. 4.43e, flecha blanca). El gran poder erosivo se puede verificar observando el espesor de la mata desgarrada que forman los enrollamientos (~ 1 cm, Fig. 4.42b), y también en el espesor de la mata microbiana que queda sobre la planicie exhibiendo varias láminas superficiales en corte (~ 1 cm).

Para reconfirmar la dirección de formación de las estructuras se midieron longitud, ancho y altura de las estructuras y se comprobó que las estructuras direccionales coinciden con la orientación del canal. Estas medidas pueden observarse en los diagramas de rosas en las figuras 4.43 d y f donde las orientaciones se encuentran entre los 200° y 230° coincidiendo con la dirección del canal NE-SO. Se verificó que todas las estructuras de enrollamientos se generaron con las corrientes de flujo. Los ángulos de los ejes de los pliegues también permitieron definir que fueron generados por las mismas corrientes, que tienen mayor velocidad que las de refluo. Se reconocieron estructuras en doblez en los bordes de los desgarros (Fig. 4.43d), como también pueden encontrarse asociados a grietas de desecación. En la St3 se presentaron numerosas estructuras en doblez en dirección al mar (Fig. 4.39d) las cuales pueden haberse desarrollado a causa de corrientes de flujo provenientes del arroyo de marea formado en la planicie, en su cercanía.

De las estructuras microbianas formadas en Paso Seco, las estructuras en doblez son las únicas que también se presentan en un ambiente estuarino, que son formadas en condiciones de tormenta (Cuadrado *et al.*, 2013; 2014). En el estuario de Bahía Blanca las matas microbianas superficiales presentes en la zona supramareal poseen menor espesor (< 0,5 cm) en comparación con las de San Blas (~ 1 cm).

5.5.3. Etapa 3: Proceso de licuefacción del sedimento infrayacente

La característica de alta cohesión y baja permeabilidad de las matas microbianas superficiales permitirían definir a la planicie de Paso Seco como un acuífero libre, arenoso con techo impermeable. Frente a la inundación, el sedimento infrayacente arenoso se satura en agua, desplazando el aire de los poros hacia la superficie impermeable. La presión hidráulica (hacia arriba) ejercida por el nivel freático se contrarresta con la presión hidrostática (hacia abajo) producida por la columna de agua sobre la superficie de la planicie (Obermeier, 1996). Similares condiciones hidráulicas se desarrollan en Puerto Rosales (Cuadrado *et al.*, 2014). Sin embargo, en Paso Seco, la columna de agua se mantiene por un período prolongado donde la acción de las olas genera un aumento

intermitente de la presión sobre el sedimento infrayacente, aumentando la posibilidad de la licuefacción de la arena (Owen y Moretti, 2011).

Este mecanismo causa dos efectos: 1) el desprendimiento de la mata microbiana superficial provocado por el aire del sedimento subyacente desplazado hacia la superficie microbiana por el nivel freático; 2) la licuefacción de la arena subyacente donde la fricción interna del sedimento se reduce a casi cero y temporalmente se comporte como un fluido (Owen y Moretti, 2011). El efecto 1) explicaría la formación de los domos microbianos comúnmente encontrados cuando la planicie presenta una capa de agua. El efecto 2) explicaría los domos y pliegues rellenos por arena, la cual en estado fluido se adaptaría a la deformación previa de la mata (p.e. Fig. 4.41e). Sin embargo, no todos los domos y pliegues microbianos muestran arena relleno de la deformación de la mata (Fig. 4.36e). Resultados experimentales sobre la deformación de sedimentos blandos indican que la morfología de los sedimentos deformados dependen, entre otros, de la duración del estado de licuefacción (Owen y Moretti, 2011). Por lo tanto, la fluidización de la arena en Paso Seco sólo podría ocurrir cuando la columna de agua con olas permanece sobre la planicie por un tiempo prolongado, superando varios días (p.e. Fig. 4.6c).

En la figura 5.5 se ejemplifica el proceso de formación de las estructuras microbianas de deformación en tres etapas sustentado con fotografías tomadas en la planicie microbiana. En la primera etapa se pueden encontrar dos casos, la planicie expuesta (Fig. 5.5a- etapa 1a), y ocasionalmente con una delgada lámina de agua (Fig. 5.5a- etapa 1b), ejemplificando en ambos casos un ambiente restringido que posibilita el desarrollo de matas microbianas epibentónicas. La segunda etapa (Fig. 5.5b) representa condiciones de tormenta severas con vientos fuertes. En este escenario, el mar sobrepasa la espiga e inunda la zona generando una columna de agua superior a 50 cm de altura en menos de 5 h formando estructuras de deformación. Las más significativas son los enrollamientos de mata microbiana de gran espesor asociadas a desgarros de mata por el evento erosivo. En la tercera etapa (Fig. 5.5c), la planicie permanece inundada por varios días bajo condiciones de tormenta (vientos fuertes), desarrollando olas en la superficie de la columna de agua. Esta situación posibilita que las estructuras puedan ser rellenas por sedimento arenoso bajo el mecanismo de licuefacción. Esto explicaría los pliegues y domos rellenos por sedimento arenoso. puedan ser rellenas por sedimento arenoso

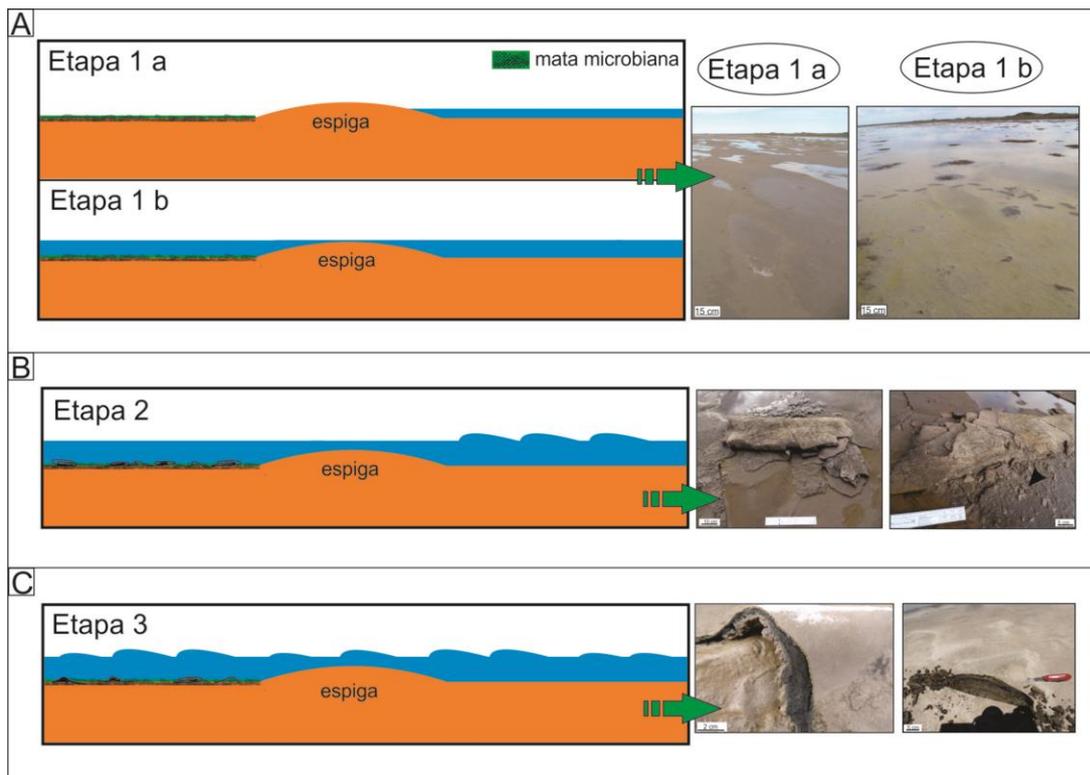


Figura 5.5. Esquema de formación de matas microbianas desarrollado en 3 etapas. a) Etapa 1a: Colonización del sedimento por matas microbianas. Etapa 1b: Inundación de la planicie por tormentas moderadas. b) Etapa 2: Procesos físicos. El agua ingresa al área de estudio con gran energía y genera estructuras microbianas de deformación. c) Etapa 3: Proceso de licuefacción del sedimento infrayacente. Luego de permanecer inundada la zona por varios días, algunas estructuras de deformación son rellenas por el sedimento infrayacente arenoso.

bajo el mecanismo de licuefacción. Esto explicaría los pliegues y domos rellenos por sedimento arenoso.

5.6. Preservación de las estructuras sedimentarias microbianas.

5.6.1. Recolonización

La recolonización se produce en los momentos de calma y es la reactivación de la actividad microbiana, la cual genera una nueva superficie microbiana. Existen numerosos factores capaces de desencadenar la recolonización, entre los que se encuentran factores extrínsecos como ser las inundaciones, períodos prolongados de radiación solar,

y calma (Noffke, 2010). Como factor intrínseco se considera el crecimiento de los microorganismos impulsados por la colonización de los sedimentos. El estudio realizado por Pan *et al.*, (2018) sostiene que luego de una acción física sobre la mata microbiana (p.e. una inundación) se desencadena una respuesta de los microorganismos donde los filamentos de cianobacterias y fundamentalmente las diatomeas bentónicas empiezan a recolonizar el sedimento. Según Noffke (2010), luego de las condiciones de tormenta que dan lugar a las estructuras microbianas, se desarrolla un período de tranquilidad donde ocurre la recolonización (Fig. 4.43a). Para que este fenómeno se lleve a cabo, es necesario que la planicie se encuentre con una lámina de agua de pocos centímetros o con abundante humedad. En la planicie de Paso Seco se desarrollan depresiones conteniendo agua de mar de manera efímera, donde se documentó la recolonización de microorganismos en forma de una estructura reticulada de color marrón con textura gelatinosa. Las retículas presentan un espesor de ~ 3 mm y se encuentran separadas entre ellas por 4,5 mm, creando un reticulado geométrico (Fig. 4.44a). Por debajo de este reticulado se observan burbujas < 2 mm de diámetro causadas posiblemente por la actividad metabólica y fotosintética de los microorganismos (Fig. 4.44b). Cuando el agua retenida en estas depresiones se evapora, se preserva el *biofilm* homogéneo de color marrón el cual no deja observar el sedimento infrayacente (Fig. 4.44d). Presenta una morfología compleja con numerosos grupos de crestas de 2,5 mm de diámetro, perpendiculares entre sí junto con depresiones, en donde las intersecciones de las crestas se forman protuberancias (Cuadrado y Pan, 2018).

La migración de los microorganismos a la superficie formando una estructura de retículas ha sido descrita en otras planicies (Bose y Chafetz, 2009) y no sólo se forma en la superficie de las depresiones. Los filamentos que generan estas retículas también unen los bordes de la estructura de deformación con la mata superficial, donde se amalgaman y generan una nivelación (Noffke, 2010) (Fig. 4.44e). Algunas estructuras de erosión y deformación, como las superficies de desgarró y dobleces de mata microbiana dejan sedimento infrayacente expuesto, formando leves depresiones en la planicie (profundidad de ~0,5 cm). Bajo condiciones apropiadas de humedad este sedimento es recolonizado por la comunidad microbiana.

Durante el invierno, las frecuentes inundaciones mantienen suficiente humedad durante períodos prolongados (días a meses) en la planicie, permitiendo a los microorganismos colonizar la superficie del sedimento, aún los bordes de las estructuras de

deformación, que se vuelven difusas hasta ser cubiertas por una nueva capa sedimentaria (Fig. 4.44).

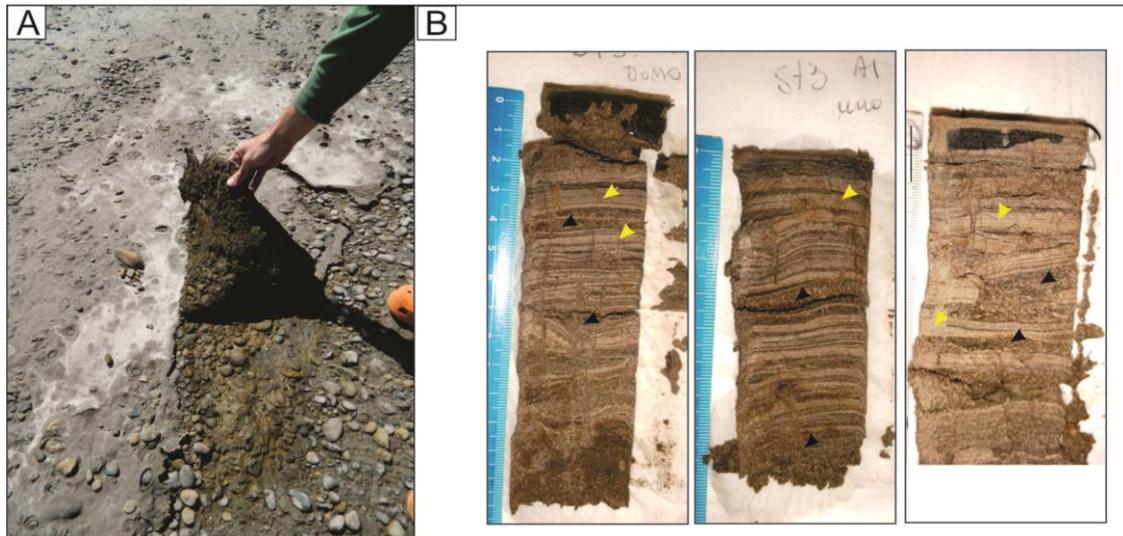


Figura 5.6. a) Mata microbiana que incorporó rodados depositados en la superficie colonizada. b) Testigos de sedimento donde se observa la biolaminación.

Al mismo tiempo, el proceso de recolonización es el que permite la generación de las biolaminitas, ya que durante la formación de las matas microbianas se desarrollan las condiciones propicias para incorporar objetos depositados en la superficie que coloniza, como ser restos de conchillas, o rodados (sedimento preexistente) (Fig. 5.6a). Según Noffke (2010) la lámina orgánica aumenta su espesor en condiciones de tranquilidad, que coinciden con la generación de las SPE (Decho, 1990). Cuanto mayor es el espesor de esta lámina, mayor es el período de calma sin sedimentación (Cuadrado y Blasi, 2018). A través de un testigo de sedimento, se observan láminas de material orgánico más antiguas cubiertas por las más jóvenes (Fig. 5.6b). Las láminas o capas de arena que forman parte de las biolaminitas corresponden a un aumento de energía en el ambiente. En la figura 5.7a se observa la biolaminación natural en una pared erosionada del arroyo de marea, donde se presentan estructuras deformadas o pliegues de menor envergadura pero similares a los que se desarrollan en superficie (Fig. 5.7b). Luego del soterramiento, las estructuras pueden preservarse y ser identificadas a través de los testigos de sedimento a diferentes profundidades (Fig. 5.7c).

5.6.2. Precipitación de minerales autigénicos

Los microorganismos que forman parte de la mata microbiana tienen una baja

probabilidad de ser preservados (Noffke y Paterson, 2008). Sin embargo la presencia de microorganismos en el sedimento brinda condiciones favorables para la precipitación o disolución mineral (Gallagher *et al.*, 2014). Dupraz *et al.* (2009) proponen que la precipitación de minerales está determinada por procesos microbiológicos y físico-químicos, donde los primeros dependen de la cantidad y calidad de las SPE, que a su vez dependen del tipo de microorganismos y su metabolismo.

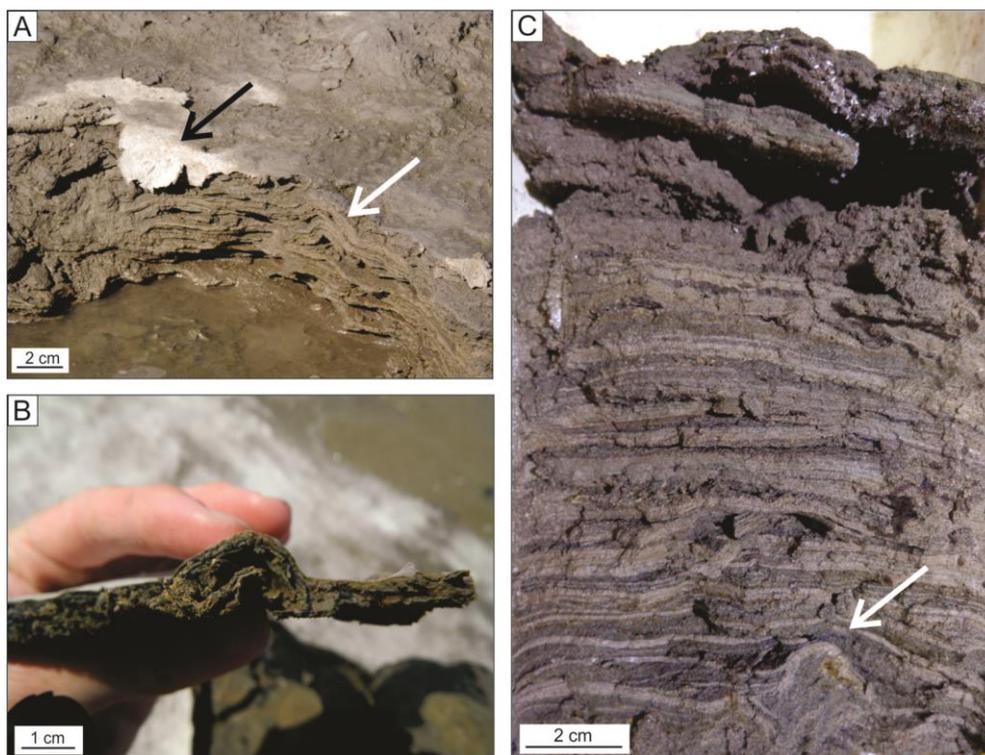


Figura 5.7. a) Pared erosionada en la planicie de Paso Seco donde se observa la biolaminación característica. Se destaca la mata microbiana superficial cubriendo parte del perfil sedimentario (flecha negra). Nivel de mata microbiana deformado en el perfil sedimentario (flecha blanca). b) Perfil de mata microbiana superficial deformada. c) Testigo sedimentario de la planicie de Paso seco donde se identifica la biolaminación. A los 10 cm de profundidad se observa un nivel de mata microbiana deformado, posiblemente un pliegue de mata microbiana (flecha blanca).

Al mismo tiempo estos procesos microbiológicos pueden influir en los procesos físico-químicos cambiando condiciones de pH, concentración de ión Ca^{2+} , para favorecer la precipitación o disolución de minerales.

Por debajo de la mata microbiana activa se produce el decaimiento de la materia orgánica debido a la presencia de microorganismos lo que conlleva a la falta de oxígeno en ese nivel (Gerdes *et al.*, 1985). Este proceso se puede ver reflejado en los resultados de Eh en la zona subsuperficial, donde los valores son negativos hasta -340 mV. Es

importante destacar que este entorno reductor se puede llevar a cabo a pesar de que la mata microbiana superficial se encuentre inundada (Gerdes *et al.*, 1985). Al mismo tiempo, el potencial redox negativo indica gran actividad de electrones sumada a una elevada actividad anaeróbica (Teasdale *et al.*, 1998). El pH que se midió en el sedimento de la planicie de Paso seco es neutro a levemente alcalino. Esto, sumado al Eh negativo junto con altas concentraciones de Fe^{2+} y una posible reducción de SO_4^{-2} proveniente del agua de mar (Teasdale *et al.*, 1998), son factores que posibilitan la formación de minerales anóxicos por debajo de la mata microbiana activa como por ejemplo la pirita (Schieber, 1999). Más recientemente, algunos trabajos relacionados a la precipitación del sulfuro en matas microbianas sostienen que la actividad conjunta de las bacterias reductoras de hierro con las bacterias sulforeductoras, ambos tipos presentes en la capa anóxica de la mata microbiana dan lugar a la formación de la pirita (Dupraz y Vissher, 2005; Vissher y Stolz, 2005; Baumgartner *et al.*, 2006).

La presencia de la pirita dentro de las matas microbianas es común, y es uno de los indicadores indirectos que se utiliza para identificar la presencia de microorganismos en depósitos sedimentarios (Schieber, 2004). La identificación de pirita framboidal en muestras de Paso Seco se hicieron en un pH de hasta 8 junto con valores de Eh de hasta -300 mV. La presencia del sulfuro de Fe se desarrolla de forma similar en el ambiente estuarino de Bahía Blanca (Bournod *et al.*, 2014). Otro indicador indirecto que se puede determinar para identificar la presencia de microorganismos en los depósitos sedimentarios es la composición del carbono en las muestras de sedimento, ya que de acuerdo a los resultados obtenidos, el porcentaje de carbono total es mayor en los niveles de mata microbiana que en niveles arenosos. Al mismo tiempo, dentro del nivel microbiano el porcentaje de carbono orgánico es mayor que el carbono inorgánico.

5.6.3. Precipitación de carbonato de calcio

Uno de los resultados más importantes relacionados con la precipitación mineral identificada en este trabajo es la precipitación de láminas de carbonato de calcio dentro de las matas microbianas. Chafetz y Buczynski (1992) realizaron estudios en laboratorio sobre la precipitación de carbonato de calcio en matas microbianas vivas, muertas y esterilizadas, con y sin agregado de bacterias y se comprobó que el precipitado de CaCO_3 sólo se desarrollaba ante la presencia de las bacterias. Al mismo tiempo, las cianobacterias muertas eran recubiertas de carbonato de calcio mucho más rápido que

las cianobacterias vivas, aunque Kühl *et al.* (2003), también basados en cultivos de laboratorio, sostienen que debido a la actividad fotosintética de las cianobacterias que causan un aumento del pH, se logra la precipitación de calcita de grano extremadamente fino. Esta analogía parece apuntar a que la precipitación de las láminas de micrita de las secuencias estudiadas en el ambiente natural es inducida por el aumento en la alcalinidad originada por los microorganismos, donde la actividad fotosintética, la degradación de las SPE y la actividad metabólica de las bacterias sulfato-reductoras influyen en el cambio de las condiciones geoquímicas y liberación de iones Ca^{2+} (Dupraz *et al.*, 2004, 2009).

El problema de la calcificación en matas microbianas ha sido intensamente estudiado (Chafetz y Buczynski, 1992; Douglas y Beveridge, 1998; Riding, 2000; Stal, 2000; Paerl *et al.*, 2001; Kazmierczak *et al.*, 2004; Dupraz y Visscher, 2005; Altermann *et al.*, 2006; Benzerara *et al.*, 2006; Kremer *et al.*, 2008). A pesar de esto, aún no se ha alcanzado un consenso completo sobre los factores que controlan la calcificación en las matas de cianobacterias (Dupraz y Visscher, 2005; Ludwig *et al.*, 2005; Altermann *et al.*, 2006). Sin embargo, hay varios ejemplos que enfatizan la necesidad de un cierto nivel de sobresaturación de carbonato de calcio como requisito previo para iniciar el proceso de calcificación (Kempe y Kazmierczak, 1990). Otros autores consideran que la precipitación de carbonato de calcio en ciertas circunstancias es un proceso microbiológico (Douglas y Beveridge, 1998; Pentecost y Bauld, 1988) o controlado por fotosíntesis (Arp *et al.*, 2001; Ludwig *et al.*, 2005).

Los estudios de precipitación de carbonato inducido por la actividad microbiana fueron ampliamente descritos en ambientes carbonáticos; sin embargo, en ambientes silicoclásticos apenas se han descrito procesos similares. Kremer *et al.* (2008) sostienen que las condiciones que prevalecen en las matas microbianas de ambientes costeros silicoclásticos deberían dar como resultado, al igual que las matas en costas carbonáticas, una sobresaturación de carbonato de calcio. Por ello se esperaría encontrar el carbonato de calcio como precipitado corriente en estos sistemas, sin embargo no es así. Buscando una respuesta, Dupraz *et al.* (2004) sostiene que los grupos funcionales de la materia orgánica extracelular (compuesta de SPE y carbono orgánico de bajo peso molecular) están cargados negativamente y pueden inhibir la precipitación de carbonato de calcio mediante la selección de cationes (Sutherland, 2001; Dupraz y Visscher, 2005; Braissant *et al.*, 2007; Paterson *et al.*, 2008). Esto conduce a un agotamiento del Ca^{2+} libre dentro

del *biofilm* que incluso en condiciones alcalinas puede inhibir la precipitación de carbonatos (Braissant *et al.*, 2007; Dupraz *et al.*, 2009). Sin embargo, en Paso Seco, se ha verificado la precipitación de yeso (CaSO_4) que sucede a la precipitación de carbonato, indicando que hay un exceso de Ca^{2+} .

Es importante destacar las condiciones físicas que se desarrollan en Paso Seco, los períodos de inundación-deseccación, que cumplen un papel fundamental en la precipitación de carbonato, principalmente en el período estival. Luego del pico máximo de inundación, en muchas ocasiones el agua de mar tarda varias horas o días en retirarse debido a la baja velocidad del reflujó. Parte del agua de mar queda retenida en depresiones, bajo condiciones de radiación solar y alta temperatura, y eventualmente fuertes vientos. Por evaporación del agua de mar precipitan minerales evaporíticos (Lowenstein *et al.*, 2003) en los bordes de las depresiones. Típicamente comienza la precipitación de CaCO_3 , hasta agotar el HCO_3^- de la solución; luego, el remanente de Ca^{2+} en solución precipita como CaSO_4 hasta que el Ca^{2+} precipite por completo. Por último, el ion Na^+ precipita como NaCl . Frente a una nueva inundación, el CaSO_4 y la NaCl son las evaporitas que primero se disuelven, aunque el CaCO_3 queda precipitado como se ha identificado en secciones delgadas petrográficas y micrografías de MEB (Fig. 4.33c, d). El proceso de disolución de los minerales de CaSO_4 y de NaCl puede ser la causa de que no se identifiquen en secciones delgadas como es el caso de los niveles bien definidos de CaCO_3 . La secuencia relacionada con la presencia de CaCO_3 en los cortes delgados permite identificar la interacción del entorno evaporítico silicoclástico con los microorganismos (Maisano *et al.*, 2017; Quijada *et al.*, 2017) (Fig. 5.8a, b, c). En la base de la secuencia, la Lámina 1 se encuentra con base neta y compuesta por granos de arena y limo, la cual representaría una descarga relativamente brusca de granos durante un episodio de ingreso de agua en la planicie, con fuertes corrientes de flujo que transportan sedimentos arenosos (Fig. 5.8c; L1). Luego, el ambiente queda inundado durante horas/días, donde las cianobacterias y diatomeas pueden generar abundante materia orgánica y SPE, ya que la materia orgánica que enriquece el sedimento es producto de la actividad fotosintética de las cianobacterias y diatomeas (Kremer *et al.*, 2008).

La Lámina 2 (Fig. 5.8c; L2) está compuesta por arcillas y limo con materia orgánica. Se caracteriza por la presencia de moldes de filamentos con orientación predominantemente subverticales entre los granos. Las cianobacterias se orientan verticalmente y alcanzan el agua sobrenadante cuando se ha restablecido el ambiente calmo (Consalvey *et al.*, 2004). Noffke (2010) ha determinado que la presencia de filamentos

orientados verticalmente en el agua por encima de la superficie de la mata microbiana puede aumentar la viscosidad dinámica del agua, y favorecer la caída de partículas finas en el área cercana a la superficie. Este mecanismo se ha denominado *baffling* y *trapping* por Noffke *et al.* (2007), que indicaría la deflexión de la corriente y adherencia del sedimento fino a la superficie.

Los moldes de filamentos de cianobacterias con posición subvertical continúan en la lámina superior de carbonato de calcio identificada como Lámina 3 (Fig. 5.8c; L3). Se ha determinado que el mineral precipitado corresponde a calcita en base a los análisis de tinción de carbonatos, y forma un precipitado micrítico denso. La precipitación de carbonato comienza cuando el agua se ha reducido un 50 % del volumen inicial por evaporación. Este proceso de precipitación de sales fue estudiado por Usiglio (1849) quien describió el orden de la precipitación de sales de forma cuantitativa (Secuencia de Usiglio). Mientras la planicie se encuentre inundada, las cianobacterias siguen manteniendo su posición vertical, perpendicular a la planicie, aún mientras precipita CaCO_3 . Ello se refleja en la capa de carbonato con moldes verticales de cianobacterias (Fig. 4.33c, d). Las SPE que rodean los filamentos pueden actuar nucleando el carbonato (Dupraz *et al.*, 2005; Kremer *et al.*, 2018).

La materia orgánica de la lámina superior al carbonato (Lámina 4) muestra una orientación horizontal, producto de dicha posición por parte de las cianobacterias entre escasos granos, cuando la planicie queda expuesta a la radiación solar. Fenchel (1998) también encontró esta diferenciación en la distribución de las haces de cianobacterias en cultivos de laboratorio. Dentro de un sustrato artificial encontraron haces de cianobacterias subverticales, mientras que en la superficie se ubicaba una lámina de filamentos orientados horizontalmente.

Un posible mecanismo de formación del precipitado carbonático se ha esquematizado en la figura 5.8d donde en la etapa 1, la planicie se encuentra cubierta por una mata microbiana. En la etapa 2, luego de la inundación, los filamentos de cianobacterias ubicados en la superficie retienen partículas clásticas. Luego, en la etapa 3, los microorganismos se desplazan hacia la superficie. En la etapa 4, la evaporación de la lámina de agua provoca que se alcance el punto de saturación de carbonato. En este punto precipita carbonato micrítico en la parte más superficial de la mata microbiana, nucleando en las SPE. En la etapa 5, al agotarse el CO_3^{2-} , la precipitación de carbonato cesa y los microorganismos empiezan a colonizar la superficie. En la última etapa 6, los filamentos se ubican paralelos a la superficie de la planicie.

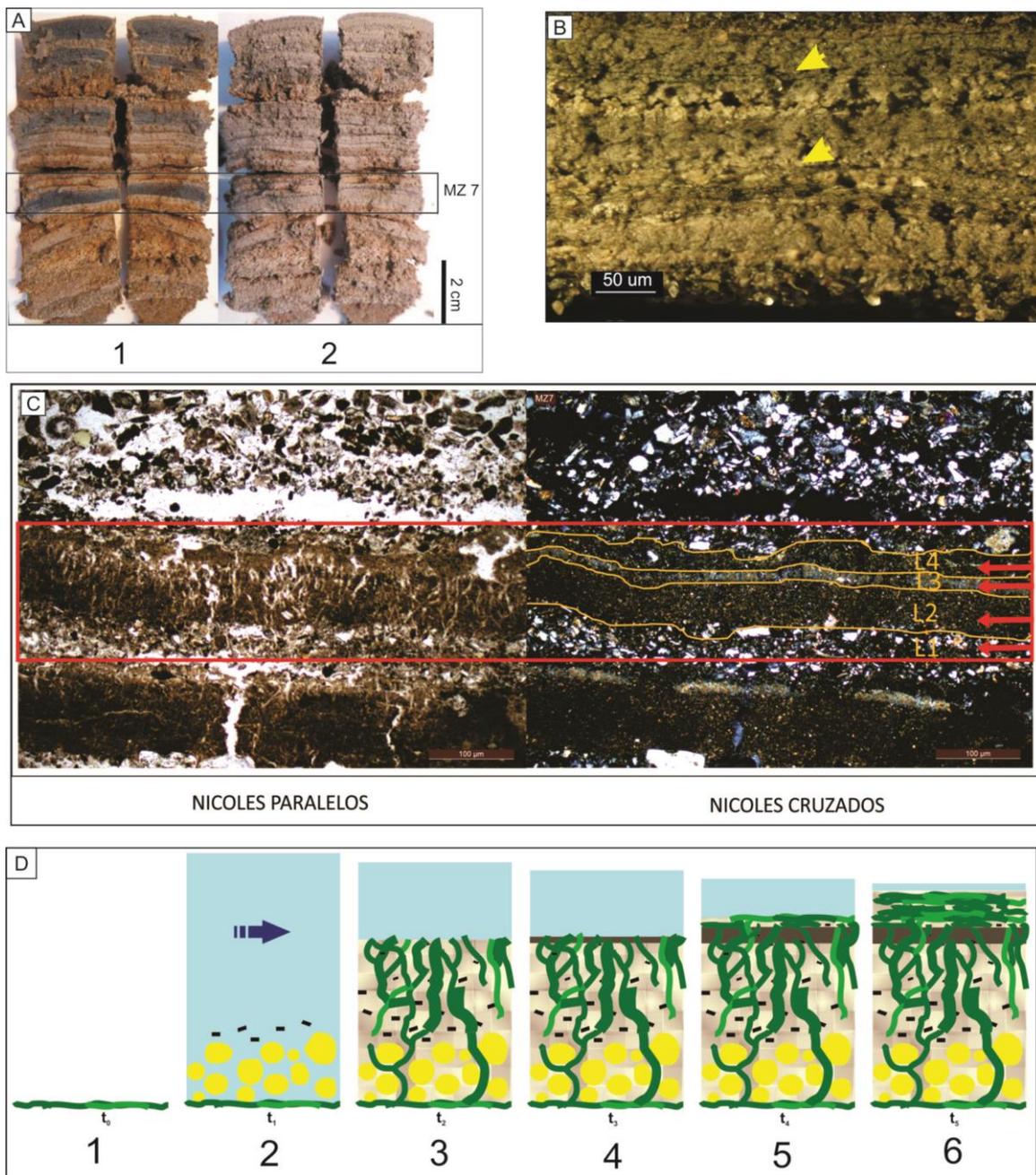


Figura 5.8 a) Testigos de sedimento de Paso Seco. 1) con humedad. 2) Sin humedad. En el recuadro se destaca la ubicación de un corte delgado donde se encontraron láminas continuas de precipitado carbonático. b) Fotografía mediante la lupa estereoscópica, donde se observa material precipitado de color claro, junto con niveles de SPE (flecha amarilla). c) Microfotografía del corte delgado de figura (b) donde se observa L1, L2, L3 y L4. d) Posible mecanismo de formación del nivel de precipitado carbonático (detalles en el texto).

En un ambiente carbonático actual como Bahamas, esta disposición vertical y posteriormente horizontal, también fue identificada por Dupraz *et al.* (2013), en presencia de carbonato micrítico, aunque estos autores interpretan que su presencia es consecuencia del reemplazo de la materia orgánica por degradación sin afectar los filamentos

de los microorganismos. Estos autores identificaron una alteración en las láminas primarias que quedan por debajo luego del crecimiento de la microbialita, reconociendo sólo vestigios de la preservación. En Paso Seco, por el contrario, la secuencia que incluye la precipitación carbonática no registra alteración visible.

Hasta donde se sabe, no se han observado láminas de carbonato tan bien definidas en un horizonte concreto de las biolaminitas como las presentadas en esta investigación. La presencia de matas microbianas en esta planicie es un factor importante para la precipitación del CaCO_3 por diferentes motivos. Uno de ellos es la baja permeabilidad de la mata que promueve la retención de agua de mar sobre la superficie, que luego será evaporada. Por otro lado, la presencia de microorganismos favorece el pH básico en el sedimento, condición necesaria para la precipitación carbonática. Por último, es probable que las SPE de los filamentos actúen como nucleación del Ca^{2+} y el exceso precipite como carbonato formando láminas y preservándose en profundidad.

En concreto, las particularidades del ambiente sedimentario, el marcado carácter estacional produce que al finalizar el invierno y luego de una inundación, las matas queden expuestas a la radiación solar, altas temperaturas y consecuente evaporación, con lo cual se llega a alcanzar la sobresaturación y consiguiente precipitación de calcita, yeso y halita. Sin embargo, como esta precipitación se encuentra atravesada por moldes verticales de cianobacterias, el carbonato ha precipitado simultáneamente cuando las cianobacterias tenían una posición vertical activa. Estos resultados permiten descartar que la precipitación de carbonato se logre cuando los polisacáridos extracelulares se degradan, como afirman Reid *et al.* (2000), Stal (2000) y Petrisor *et al.* (2004), entre otros.

Por el contrario, los resultados parecen congruentes con los presentados por Kremer *et al.* (2008), quienes sostienen que el carbonato no se originó a partir de la descomposición de la materia orgánica. Estos autores arribaron a estos resultados en base al análisis de la composición isotópica de carbono estable del carbonato de calcio que mostró solo un ligero agotamiento de $\delta^{13}\text{C}$.

En definitiva, la planicie de Paso Seco colonizada por matas microbianas es un *laboratorio natural excepcional*, que nos permite continuar investigando la interacción entre las condiciones extrínsecas e intrínsecas que da lugar a precipitados autigénicos. Ambas condiciones actúan complementándose para lograr la precipitación y preservación del carbonato de calcio que puede favorecer la preservación de las estructuras sedimentarias (Fig. 5.8d).

5.7. Importancia de la geomorfología en la generación de estructuras microbianas de deformación

Bouougri y Porada (2012) documentaron estructuras microbianas de deformación en el sudeste de Túnez similares a las descritas en el presente trabajo. En su trabajo describen las estructuras de doblez y pliegues de mata microbiana en una planicie de marea donde la zona supramareal es inundada durante eventos de sicigia o fuertes vientos costeros. A pesar de que las condiciones son similares a las de Paso Seco, estos autores relacionan la formación de las estructuras con la acción de los vientos que actúan sobre matas microbianas flotantes, o sumergidas bajo una fina capa de agua. De acuerdo a su estudio el fenómeno que desencadena las estructuras sedimentarias de deformación es la fuerza producida por los vientos a diferencia del presente trabajo en Paso Seco, donde las estructuras de deformación son causadas por corrientes de agua. Además, según Bouougri y Porada (2012), las estructuras de deformación se generan a partir de grietas de desecación, mientras que en Paso Seco se pudo documentar que las estructuras pueden generarse no sólo a partir de una grieta, sino que pueden intervenir pisadas de animales o montículos de vegetación característica del lugar, o simplemente al gran esfuerzo generado por la acción del flujo.

Por otro lado, estudios realizados en la costa de Texas (Estados Unidos) por Bose y Chafetz, (2009) relacionaron diferentes ESIAM con el espesor de la mata microbiana, el cual varía de acuerdo a la topografía del área de estudio. Dicha investigación se desarrolló en un ambiente micromareal, donde la planicie es inundada por mareas de sicigias. A través de la planicie, en zonas elevadas era común el desarrollo de retículas y en las zonas deprimidas era frecuente la presencia de las estructuras en domos. Muchas de las ESIAM descritas en Texas se encuentran también en Paso Seco, con la diferencia de que en Paso Seco la ocurrencia de las ESIAM se discriminan de acuerdo a la posición en el antiguo canal, ya sea en la parte interna donde se producen las mayores estructuras de deformación como pliegues, superficies de desgarró y enrollamientos de mata microbiana o en los bordes del canal donde generalmente se encuentran los bolsillos de erosión. Por otro lado, la ausencia de las estructuras de deformación direccionales como las superficies de desgarró o enrollamientos de matas microbianas en la costa de Texas,

refuerza la idea de que la geomorfología en el canal de Paso Seco es sustancial en el desarrollo de las estructuras sedimentarias de erosión y deformación.

El área de Paso Seco es un antiguo canal de marea que estuvo sumergido y actualmente presenta una morfología elongada de cerca de 3 km de longitud, que tiene un carácter semi restringido debido a una espiga costera formada hace más de 100 años (Witte, 2016; Espinosa e Isla, 2011). Por consiguiente la zona no es afectada por las mareas diarias. La formación de una espiga costera y el desplazamiento de la línea de costa genera un proceso progradacional que tiene lugar cuando el nivel del mar es estable y la línea de costa se mueve hacia el mar. En condiciones de tormentas (cuando las olas superan los 2 m), el agua de mar llega a sobrepasar la espiga de arena. En estos momentos, los vientos pueden ayudar a concentrar la marea creciente en el antiguo canal que ingresa por una boca estrecha y como consecuencia la corriente de agua se acelera al momento de ingresar a la planicie de Paso Seco. Durante la inundación, la columna de agua puede alcanzar una profundidad de alrededor de 70 cm sobre la planicie en pocas horas junto con fuertes corrientes de tracción actuando sobre las matas microbianas. Estos procesos son acentuados por la morfología de un canal angosto, ya que las corrientes ingresan con mucha velocidad, rompen la mata microbiana superficial y forman estructuras de erosión y deformación como las fisuras sobre las matas microbianas con la sucesiva generación de desgarros, enrollamientos, pliegues y dobleces. En la figura 5.9 se realiza una comparación de la energía de la inundación con las estructuras de erosión y deformación. Las estructuras que se generan con baja energía son más simples y de menor tamaño como ser domos o dobleces, y a medida que la energía aumenta las estructuras que se desarrollan son más complejas y de mayor envergadura como las superficies de desgarro, pliegues y enrollamientos. Al mismo tiempo las estructuras de mayor complejidad en muchos casos presentan direccionalidad como ser los bolsillos de erosión, la superficie de desgarro y los enrollamientos. Se confeccionó un esquema con las dimensiones de cada estructura (Fig. 5.10) donde se discrimina las que presentan direccionalidad, indicando la dirección en que se desarrolló la inundación.

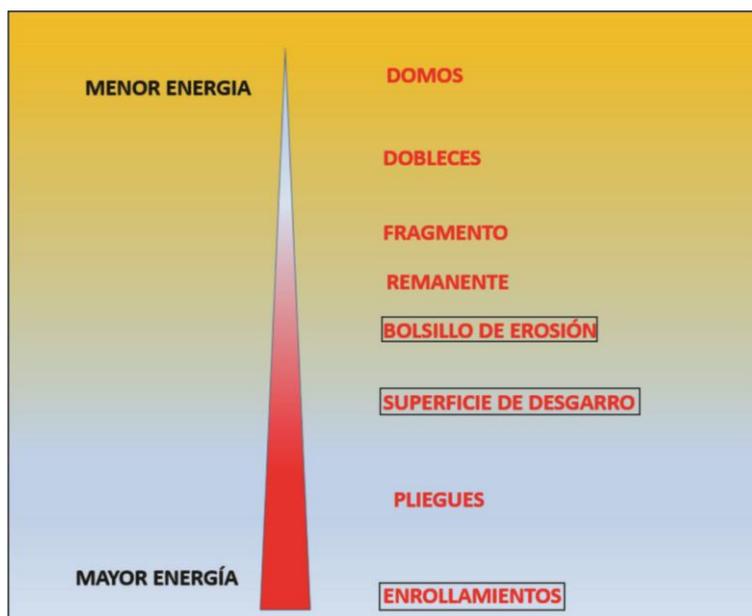


Figura 5.9. Esquema que relaciona la energía de la inundación (evento erosivo) y la generación de las estructuras de erosión y deformación

EMD	TAMAÑO				ESPESOR	DIRECCIONALES	OBSERVACIONES
	L	A	Ah	D			
DOMO				< 5 cm 5- 20 cm	1 cm	no	
DOBLEZ	~ 39 cm	~ 11 cm			0,5 cm	no	Dirección variable. Asociado a otras estructuras
FRAGMENTO	< 10 cm 10 cm- 2 m					no	
REMANENTE						no	
BOLSILLO DE EROSIÓN	3- 8 m					si	Ondulitas. No describe orientación/sentido de corriente
SUPERFICIE DE DESGARRO	≤ 8 m					si	Generan enrollamientos
PIEGUES					0,5- 1 cm	no	Dirección variable. Asociado a otras estructuras
ENROLLAMIENTO	~60 cm	32 cm	13 cm		~ 1 cm	si	Describe orientación de corriente. Formado a partir de SD

Figura 5.10. Dimensión de las estructuras de deformación y sus características

5.8. Comparación con estructuras de deformación en el registro sedimentario.

La deformación que presentan las matas microbianas como respuesta a un esfuerzo de corte de una fuerte corriente de agua puede asemejarse a los estratos deformados en el registro sedimentario, que muchas veces es difícil de explicar por un proceso físico. En especial, las estructuras de deformación de sedimentos blandos (conocidos como *soft sediment deformation structures*, SSDS) estudiados en sedimentos silicoclásticos, generalmente se desarrollan cuando la estratificación primaria es deformada, y como requisito para producirse no deben estar litificados (Shanmugam, 2017). Una de las explicaciones para este tipo de estructuras se basan en movimientos sísmicos, o diferentes pulsos de energía donde se producen procesos alternantes de decantación de pelitas y areniscas (Zavala *et al.*, 1992), aunque durante la última década esta explicación resulta poco satisfactoria (Owen y Moretti, 2011). Una de las estructuras sedimentarias de sedimentos blandos que son descritas en la bibliografía son las laminaciones convolutas, donde el proceso de formación aún se desconoce (Gladstone *et al.*, 2017).

Tanto las estructuras sedimentarias de deformación inducidas por microorganismos, como las producidas en sedimentos blandos tienen características de formación similares. Entre estas similitudes se encuentran las que se desarrollan en sedimentos laminares no consolidados, con porcentaje elevado de limo, junto con arena intercalada con arcillas y limo, y generalmente presentan un comportamiento plástico frente a la sedimentación. Estudios realizados por Hill y Corcoran (2018) evaluaron el rol de las matas microbianas en estructuras sedimentarias de sedimentos blandos del proterozoico en Canadá donde afirmaron que las matas estuvieron presentes, pero no presentaron un papel fundamental en la formación de las estructuras de deformación. Sin embargo, los estudios realizados en el ambiente actual como Paso Seco documentan *in-situ* la respuesta flexible que tienen las matas microbianas frente a fuertes corrientes de agua, lo que nos permite fundamentar que las matas microbianas tienen un papel muy importante en la generación de estructuras sedimentarias de deformación. El mecanismo de la inundación genera primero una fuerza de corte sobre la superficie de la mata que induce a la deformación, sumado a la licuefacción del sedimento infrayacente que genera el movimiento de la arena subyacente, acomodándose a la deformación de la mata microbiana.

Estos procesos, deformación y licuefacción, concuerdan con los establecidos por Owen y Moretti (2011) para la determinación de estructuras sedimentarias de deformación en sedimentos blandos encontrados en rocas.

Cuadrado y Blasi (2018) indican diferentes elementos para reconocer la presencia de microorganismos en las rocas sedimentarias que también han sido observados en el presente estudio. Tal es el caso de la identificación de la formación de una laminación de espesor milimétrico a centimétrico, a veces con micro-ondulaciones, alternado con sedimentos clásticos. Otro elemento importante a tener en cuenta es la distribución granulométrica bimodal con modas en las fracciones arena fina y limo procedentes de las matas microbianas, como en las muestras de Paso Seco, sumado a una distribución con tendencia a la unimodalidad en las correspondientes capas clásticas entre las matas microbianas. En el presente estudio, la materia orgánica está representada con un porcentaje más elevado en la sucesión de láminas correspondientes a actividad microbiana (sedimento fino) que en las capas arenosas. También se ha reconocido una micro-fábrica laminada en secciones delgadas con la identificación de la precipitación de láminas de calcita. La formación de ciertas estructuras como domos, pliegues y enrollamientos se ha verificado que es consecuencia de la cohesividad y plasticidad de las matas microbianas. En cuanto a la mineralogía, se puede agregar que los indicadores pueden ser la presencia de carbonato micrítico con desarrollo o no de moldes de filamentos, sulfatos y cloruros y/o la presencia de minerales autigénicos como la pirita.

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES

El área de estudio, Paso Seco, es un antiguo canal de marea restringido, actualmente expuesto debido a recientes procesos de progradación. La formación de extensa matas microbianas ha permitido estudiar la interacción entre ellas y la dinámica del ambiente sedimentario. Se han identificado diferentes estructuras microbianas de deformación como consecuencia de eventos erosivos. Los microorganismos que se encuentran colonizando el sedimento desarrollan actividades fotosintéticas y metabólicas generando la capacidad de modificar el entorno geoquímico en el que se encuentran y preservando las estructuras sedimentarias primarias. El estudio realizado permite arribar a las siguientes conclusiones:

1. Los valores de Eh medidos en el agua son indicio de los cambios que se producen durante la inundación y desecación de la planicie. Cuando la planicie se encuentra inundada, el Eh en el agua presenta valores más positivos debido a que hay mayor volumen de agua en la planicie, mayor porcentaje de oxígeno disuelto y como consecuencia el intercambio de electrones y actividad anaeróbica se ve reducida. Los valores más negativos de Eh, donde se desarrolla mayor actividad de electrones y mayor actividad anaeróbica, se registraron durante los meses estivales donde la humedad en la planicie es menor.
2. El Eh en el sedimento varía de acuerdo a la profundidad. En la capa superficial, donde se desarrolla la mata activa, se encuentran los valores más positivos, esto coincide con mayor disponibilidad de oxígeno. En esta zona posiblemente se desarrolla una pátina de composición férrica alrededor de los cristales. Por otro lado, los valores de Eh en la capa subsuperficial se encuentran por debajo de los -200 mV. Esto indica una gran actividad metabólica de los microorganismos, que promueven al intercambio de electrones y una intensa actividad anaeróbica.

Esto puede verse reflejado en el color gris oscuro a negro de la capa subsuperficial y en la precipitación de minerales autigénicos como la pirita.

3. La pirita encontrada en el sedimento es producto de las condiciones geoquímicas que tienen lugar en la planicie colonizada por matas microbianas. El pH neutro a levemente alcalino, sumado a una acumulación de materia orgánica debido a la presencia de microorganismos, y un Eh negativo (que proviene de una alta concentración de Fe^{2+} en el sedimento y la reducción de SO_4^{2-} por actividad microbiana) son factores que posibilitan la generación del sulfuro de Fe.
4. La composición de carbono total en el sedimento demuestra que el porcentaje de C orgánico es superior al C inorgánico, encontrándose en mayor proporción en la capa activa de la superficie microbiana respecto a mayor profundidad del testigo. Por otro lado, en los testigos, las matas microbiana (sedimento fino) presentan un mayor porcentaje de carbono total que los niveles de sedimento arenoso.
5. Con respecto a las condiciones hidrodinámicas se destaca la importancia de la morfología del lugar en un ambiente progradante generado por la formación de una espiga de arena costera. El área de estudio es un antiguo canal de marea de alrededor de 3 km de longitud, actualmente expuesto, semicerrado y protegido de la influencia de marea diaria. Bajo condiciones de tormenta el agua ingresa al área de estudio en forma canalizada y en pocas horas puede alcanzar una columna de agua $> 0,60$ m sobre la planicie.
6. Las numerosas inundaciones registradas en Paso Seco coinciden con tormentas caracterizadas por fuertes vientos que favorecen el ingreso del agua de mar hacia el continente superando la espiga costera. Por la morfología alargada se forman rápidas corriente de flujo (velocidad > 50 cm/s), que permite alcanzar varios centímetros de columna de agua sobre la planicie ($> 0,5$ m) en pocas horas (< 4 h). Luego, el refluj o drenaje es gradual y presenta menor velocidad.
7. Se registraron variaciones del nivel de agua durante el año. Durante el invierno el nivel de agua se encuentra cercano a la superficie sedimentaria, la cual a veces

queda sumergida por un periodo prolongado. Durante el verano, el nivel de agua normalmente se encuentra hasta 40 cm por debajo de la superficie, quedando la superficie microbiana expuesta a radiación solar.

8. De acuerdo al tipo de sedimentación, a mayor número de inundaciones que sufre la planicie de marea, mayor es el número de láminas microbianas que se encuentran en el sedimento. Como ejemplo se presentan los testigos de la St3, los cuales desarrollan mayor densidad de láminas de matas microbianas en profundidad que en St4.
9. En invierno se generan las condiciones para el desarrollo de la mata microbiana por períodos prolongados, ya que la planicie se encuentra con humedad constante, lo que promueve la actividad microbiológica. Al mismo tiempo, en condiciones de humedad, la mata microbiana desarrolla gran flexibilidad. Frente a un evento erosivo como al ingreso de agua de mar, la mata superficial se deforma generando estructuras microbianas de envergadura como por ejemplo enrollamientos, pliegues y domos. Por otro lado, durante los meses estivales la planicie se encuentra expuesta a mayor radiación solar, la mata microbiana pierde humedad y flexibilidad lo que conlleva a desarrollar otras estructuras microbianas como grietas de desecación.
10. Se ha identificado en Paso Seco el mecanismo de generación de estructuras microbianas de deformación frente a un evento de erosión. En primer lugar durante los momentos de baja energía se produce la colonización del sedimento por matas microbianas mediante la bioestabilización. De esta forma se genera en la planicie una superficie suave y resbaladiza (mata microbiana epibentónica) que puede estar expuesta a corrientes de agua sin romperse. Cuando las corrientes superan el esfuerzo de corte, la mata microbiana se erosiona, se desgarran, y deforma generando estructuras sedimentarias microbianas como enrollamientos, pliegues de mata, dobleces.
11. Cuanto mayor es el poder erosivo de la inundación, mayor es el espesor de mata que puede ser deformado.

12. Las características de cohesión y flexibilidad que poseen las matas microbianas tienen un efecto significativo frente a las condiciones hidrodinámicas imperantes para la generación de las estructuras microbianas de deformación. Las corrientes de flujo son las de mayor velocidad y responsables de la erosión de la mata microbiana con la formación de los enrollamientos de matas en sentido hacia el interior del continente.
13. Las estructuras microbianas de deformación se pueden originar a partir de debilidades de la superficie sedimentaria como las grietas de desecación. También, eventos de erosión severa desgarran la mata microbiana dejando expuesto el sedimento subyacente. Luego, la corriente desliza la mata microbiana superficial sobre el sedimento infrayacente y se forman los pliegues de mata. Los dobleces de mata microbiana pueden formarse en los bordes de las superficies de desgarrro.
14. La formación de domos microbianos se forman como resultado de la gran cohesión y baja a nula permeabilidad que presentan las matas microbianas. Cuando el sedimento infrayacente a las matas se encuentra saturado en agua durante una inundación, el aire intrasedimentario es empujado hacia la superficie y sellado por la mata microbiana, generando la separación de la mata superficial del sedimento infrayacente, y formando los domos microbianos rellenos de gases.
15. Algunas estructuras de deformación, como los pliegues y domos microbianos, se encontraron rellenas de sedimento arenoso. Durante la inundación, la presión hidrostática de la columna de agua sobre la planicie, sumada a la acción de olas sobre la superficie del agua produce la licuefacción temporaria del sedimento subyacente. El sedimento se comporta como un fluido y se acomoda debajo de la mata superficial deformada. Tanto la deformación como la fluidización son procesos requeridos para la formación de estructuras de deformación de sedimentos blandos (SSDS), principalmente las estructuras de convolución. Por lo tanto, se sugiere tener en cuenta la presencia de matas microbianas en la formación de dichas estructuras.

16. Durante los períodos de calma se produce la recolonización, generando una nueva superficie microbiana. Para que este mecanismo se desarrolle es necesario que la planicie se encuentre con una lámina de agua de pocos centímetros o con abundante humedad. Se documentó la recolonización por parte de microorganismos filamentosos en forma de estructura reticulada de color marrón con textura gelatinosa.

17. La impermeabilidad de la mata microbiana junto con un aumento de la radiación solar durante los meses estivales favorecen para que se desarrolle la evaporación del agua de mar en la planicie, y la precipitación de minerales evaporíticos como CaCO_3 (calcita). Se verificó la precipitación de CaSO_4 (yeso) que sucede a la precipitación de CaCO_3 indicando que hay un exceso de Ca^{2+} . La precipitación de CaCO_3 asociada a las matas microbianas permitiría la preservación de las estructuras de deformación generadas en Paso Seco, de manera similar a lo que ocurre en un ambiente carbonático.

18. La precipitación de láminas de calcita en las biolaminitas presentan una secuencia repetitiva. Esta secuencia comienza con granos de tamaño limo y arena fina a media con un contacto neto con la lámina infrayacente, como resultado del transporte y depositación de sedimentos durante el episodio de ingreso de agua marina. A medida que el agua se retira durante el refluo se forma una capa de materia orgánica amorfa conteniendo moldes alargados de cianobacterias que se encuentran en continuidad con la lámina suprayacente, la cual se caracteriza por la precipitación de calcita micrítica generada por evaporación del agua de mar residual. Finalmente, la lámina superior de la secuencia está compuesta por materia orgánica con textura laminada horizontal por la disposición de los microorganismos filamentosos que se ubican en esa posición. Cada una de las láminas de la secuencia refleja la interacción de los procesos intrínsecos como la actividad de los microorganismos, y extrínsecos como el ambiente sedimentario.

BIBLIOGRAFIA

- Altermann, W., Kazmierczak, J., Oren, A. y Wright, D. T., 2006. Cyanobacterial calcification and its rock-building potential during 3.5 billion years of Earth history. *Geobiology* 4, 147-166.
- Andersen, T.J. y Pejrup, M., 2011. Biological influences on sediment behavior and transport. In: Wolanski, E., McLusky, D.S. (Eds.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science 2*. Academic Press, Waltham: 289-309.
- Andres, M. S. y Reid, R. P., 2006. Growth morphologies of modern marine stromatolites: a case study from Highborne Cay, Bahamas. *Sedimentary Geology* 185, 319-328.
- Arp, G., Reimer, A. y Reitner, J., 2001. Photosynthesis-induced *biofilms* calcification and calcium concentrations in Phanerozoic oceans. *Science* 292, 1701-1704.
- Banerjee, S. y Jeevankumar, S., 2005. Microbially originated wrinkle structures on sandstone and their stratigraphic context: Palaeoproterozoic Koldaha Shale, central India. *Sedimentary Geology*, 176, 211-224.
- Baumgartner, L.K., Reid, R.P., Dupraz, C., Decho, A.W., Buckley, D.H., Spear, J.R., Przekop, K.M. y Visscher, P.T., 2006. Sulfate reducing bacteria in microbial mats: Changing paradigms, new discoveries. *Sedimentary Geology* 185, 131-145.
- Benzerara, K., Menguy, N., López-García, P., Yoon, T. H., Kazmierczak, J. y Brown, G. E., 2006. Nanoscale detection of organic signatures in carbonate microbialites. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 9440-9445.
- Bernasconi, O. H. y Cangioli, G. H., 1978. Estudio geológico relativo a la conservación de las salinas bonaerenses explotables. Comisión de Investigaciones Científicas, (Ined), La Plata.
- Blott, S. J. y Pye, K., 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms* 26, 1237-1248.
- Bose, S. y Chafetz, H.S., 2009. Topographic control on distribution of modern microbially induced sedimentary structures (MISS): a case study from Texas coast. *Sedimentary Geology* 213, 136-149.

- Bose, S. y Chafetz, H. S., 2011. Morphology and distribution of MISS: a comparison between modern siliciclastic and carbonate settings. *Microbial mats in siliciclastic depositional systems through time*: Tulsa, Society for Sedimentary Geology, 3-14.
- Bouougri, E.H. y Porada, H., 2012. Wind-induced mat deformation structures in recent tidal flats and sabkhas of SE-Tunisia and their significance for environmental interpretation of fósil structures. *Sedimentary Geology* 263, 56-66.
- Bournod, C.N., Cuadrado, D.G., Carmona, N.B., Ponce, J.J. y Pan, J., 2014. Estructuras sedimentarias inducidas por actividad microbiana (ESIAM) en la planicie de marea de Puerto Rosales, estuario de Bahía Blanca. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71, 331-344.
- Braissant, O., Decho, A. W., Dupraz, C., Glunk, C., Przekop, K. M. y Visscher, P. T., 2007. Exopolymeric substances of sulfate-reducing bacteria: interactions with calcium at alkaline pH and implication for formation of carbonate minerals. *Geobiology* 5, 401-411.
- Buhl-Mortensen, L., 1996. Amphipod fauna along an offshore-fjord gradient. *Journal of Natural History* 30, 23-49.
- Cady, S. L. y Noffke, N., 2009. Geobiology: evidence for early life on Earth and the search for life on other planets. *GSA Today* 19, 4-10.
- Cameron, B., Cameron, D. y Jones, J. R., 1984. Modern algal mats in intertidal and supratidal quartz sands, northeastern Massachusetts, USA. In: Curran, H. A. (Eds.), *Biogenic Structures: Their use in Interpreting Depositional Environments*. *SEPM* 35, 211-223.
- Chafetz, H. S. y Buczynski, C., 1992. Bacterially induced lithification of microbial mats. *Palaios*, 277-293.
- Clapperton, C. M., 1993. Nature of environmental changes in South America at the Last Glacial Maximum. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 101, 189-208.
- Consalvey, M., Paterson, D. M. y Underwood, G. J., 2004. The ups and downs of life in a benthic *biofilms*: migration of benthic diatoms. *Diatom Research* 19, 181-202.
- Cuadrado, D. G. y Gómez, E. A., 2010. Geomorfología y dinámica del canal San Blas, provincia de Buenos Aires (Argentina). *Latin American journal of Sedimentology and Basin Analysis* 17, 3-16.

- Cuadrado, D. G. y Blasi, A., 2018. Reconocimiento de actividad microbiana en ambientes silicoclásticos actuales y en paleoambientes. Estudio comparativo para el establecimiento de análogos. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 24, 39-73.
- Cuadrado, D. G. y Pan, J., 2018. Field observations on the evolution of reticulate patterns in microbial mats in a modern siliciclastic coastal environment. *Journal of Sedimentary Research* 88, 24-37.
- Cuadrado D.G., Carmona N.B. y Bournod C.N., 2012. Mineral precipitation on modern siliciclastic tidal flats colonized by microbial mats. *Sedimentary Geology* 271, 58-66.
- Cuadrado, D. G., Bournod, C. N., Pan, J. y Carmona N. B., 2013. Microbially-induced sedimentary structures (MISS) as record of storm action in supratidal modern estuarine setting. *Sedimentary Geology* 296, 1-8.
- Cuadrado, D.G., Pan, J., Gómez, E.A. y Raniolo, L.A., 2014. Microbially-colonized sediments in a wind-driven hydrodynamic coastal system. *Abstracts Book International Sedimentological Congress*: 167.
- Cuadrado, D.G., Perillo, G.M.E. y Vitale, A., 2014. Modern microbial mats in siliciclastic tidal flats: Evolution, structure and the role of hydrodynamics. *Marine Geology* 352, 367-380.
- Cuadrado, D.G., Pan, J., Gomez, E.A. y Maisano, L., 2015. Deformed microbial mat structures in a semiarid temperate coastal setting. *Sedimentary Geology* 325, 106-118.
- De Winder, B., Staats, N., Stal, L.J. y Paterson, D.M., 1999. Carbohydrate secretion by phototrophic communities in tidal sediments. *Journal of Sea Research* 42, 131-146.
- Dean, W. G., 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: Comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology* 44, 242-248.
- Decho, A.W., 1990. Microbial exopolymer secretions in ocean environments: their role(s) in food webs and marine processes. *Oceanography Marine Biology* 28, 73-153.
- Decho, A.W., 2000a. Microbial *biofilms* in intertidal systems: an overview. *Continental shelf research* 20, 1257-1273.
- Decho, A.W., 2000b. Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial *biofilms*. In: Riding, R.E., Awramik, S.M. (Eds.), *Microbial Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1- 9.

- Decho, A.W., Visscher, P.T. y Reid, R.P., 2005. Production and cycling of natural microbial exopolymers (EPS) within a marine stromatolite. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 219, 71-86.
- Decho, A. W. y Gutierrez, T., 2017. Microbial extracellular polymeric substances (EPSs) in ocean systems. *Frontiers in microbiology* 8, 922.
- Douglas, S. y Beveridge, T. J., 1998. Mineral formation by bacteria in natural microbial communities. *FEMS microbiology ecology* 26, 79-88.
- Dupraz, C. y Visscher, P., 2005. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology* 13, 429-38.
- Dupraz, C., Visscher, P. T., Baumgartner, L. K. y Reid, R. P., 2004. Microbe-mineral interactions: early carbonate precipitation in a hypersaline lake (Eleuthera Island, Bahamas). *Sedimentology* 51, 745-765.
- Dupraz, C., Reid, R., Braissan, O., Decho, A., Norman, R. y Visscher, P., 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews* 96, 141-162.
- Dupraz, C., Fowler, A., Tobias, C. y Visscher, P. T., 2013. Stromatolitic knobs in Storr's Lake (San Salvador, Bahamas): a model system for formation and alteration of laminae. *Geobiology* 11, 527-548.
- Espinosa, M. e Isla, F., 2011. Diatom and sedimentary record during the mid-Holocene evolution of the San Blas estuarine complex, northern Patagonia, Argentina. *Ameghiniana* 48, 411-423.
- Fenchel, T., 1998. Formation of laminated cyanobacterial mats in the absence of benthic fauna. *Aquatic Microbial Ecology* 14, 235-240.
- Ferrelli, F., Bohn, V.Y. y Piccolo, M.C., 2012. Variabilidad de la precipitación y ocurrencia de eventos secos en el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Proceeding IX. Jornadas Nacionales de Geografía Física, Bahia Blanca, Argentina*, pp. 15-28.
- Folk, R. L., 1954. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *The Journal of Geology* 62, 344-359.
- Folk, R. L. y Ward, W. C., 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research* 27, 3-26.
- Folk, R. L. y Chafetz, H. S., 2000. Bacterially induced microscale and nanoscale carbonate precipitates. In: *Microbial sediments*. Springer- Berlin, Heidelberg, pp. 40-49.

- Frenguelli, J., 1950. Rasgos generales de la morfología y la geología de la provincia de Buenos Aires. *Laboratorio de Ensayo de Materiales e Investigaciones Tecnológicas* 2, 1-72.
- Gallagher, K.L., Dupraz, C. y Visscher, P.T., 2014. Two opposing effects of sulfate reduction on carbonate precipitation in normal marine, hypersaline, and alkaline environments: COMMENT. *Geology* 42, 313-314.
- Gerdes, G. y Krumbein, W. E., 1987. Stromatolite environments in the peritidal zone: Modern examples. *Lecture Notes in Earth Sciences*, Berlin Springer Verlag 9, 13-140.
- Gerdes, G., Krumbein, W. E. y Holtkamp, E., 1985. Salinity and water activity related zonation of microbial communities and potential stromatolites of the Gavish Sabkha. In: *Hypersaline Ecosystems*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 238-266.
- Gerdes, G., Claes, M., Dunajtschik-Piewak, K., Riege, H., Krumbein, W. E. y Reineck, H. E., 1993. Contribution of microbial mats to sedimentary surface structures. *Facies* 29, 61-74.
- Gerdes, G., Krumbein, W.E. y Noffke, N., 2000. Microbial signatures in peritidal siliclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology* 47, 279-308.
- Gladstone, C., McClelland, H.M.O., Woodcock, N.H., Pritchard, D. y Hunt, J., 2017. The formation of convolute lamination in mud-rich turbidites. *Sedimentology* 65, 1800-1825.
- Hagadorn, J. W. y Mcdowell, C., 2012. Microbial influence on erosion, grain transport and bedform genesis in sandy substrates under unidirectional flow. *Sedimentology* 59, 795-808.
- Hill, C.M. y Corcoran, P.L., 2018. Processes responsible for the development of soft-sediment deformation structures (SSDS) in the Paleoproterozoic Gordon Lake Formation, Huronian Supergroup, Canada. *Precambrian Research* 310, 63-75.
- Horodyski, R. J., 1983. Sedimentary geology and stromatolites of the middle proterozoic belt supergroup, Glacier National Park, Montana. *Precambrian Research* 20, 391-425.
- Kaaschieter, J.P., 1965. Geología de la Cuenca del Colorado. II Jornadas Geológicas Argentinas, Actas III, Buenos Aires, pp. 251-269.
- Kempe, S. y Kazmierczak, J., 1990. Calcium carbonate supersaturation and the formation of in situ calcified stromatolites. *Facets of modern biogeochemistry* 255-278.
- Knoll, A. H., 2003. The geological consequences of evolution. *Geobiology* 1, 3-14.

- Knoll, A.H., Canfield, D.E. y Konhauser, K.O., 2012. Fundamentals of Geobiology, 1-4.
- Kremer, B., Kazmierczak, J. y Stal, L.J., 2008. Calcium carbonate precipitation in cyanobacterial mats from sandy flats of the North Sea. *Geobiology* 6, 46-56.
- Kühl, M., Fenchel, T. y Kazmierczak, J., 2003. Growth, structure and calcification potential of an artificial cyanobacterial mat. In: *Fossil and Recent Biofilms - A Natural History of Life on Earth*. (Eds.), Krumbein, W.E., Paterson, D.M., Zavarzin, G.A. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, pp. 77-102.
- Ludwig, R., Al-Horani, F. A., De Beer, D. y Jonkers, H. M., 2005. Photosynthesis-controlled calcification in a hypersaline microbial mat. *Limnology and Oceanography* 50, 1836-1843.
- Lowenstein, T.K., Hardie, L.A., Timofeef, M.N. y Demicco, R.V., 2003. Secular variation in seawater chemistry and the origin of calcium chloride basinal brines. *Geology* 31, 857-860.
- Maisano, L., Spagnuolo, J. y Cuadrado, D., G., 2016. Caracterización de sedimentos colonizados por microorganismos. Congreso Latinoamericano de Sedimentología - CLS.
- Maisano, L., I.E. Quijada, J. Pan y D.G. Cuadrado, 2017. Precipitación temprana de carbonato en presencia de matas microbianas en un ambiente silicoclástico. XX Congreso Geológico Argentino, Actas: 76-80, San Miguel de Tucumán.
- Neu, T.R., 1994. *Biofilms* and microbial mats. In: Krumbein, W.E., Paterson, D.M., Stal, L. (Eds.), *Biostabilization of Sediments*: Oldenburg, BIS Verlag, pp. 6-16.
- Noffke, N., 1998. Multidirected ripple marks rising from biological and sedimentological processes in modern lower supratidal deposits (Mellum Island, southern North Sea). *Geology* 26, 879-882.
- Noffke, N., 1999. Erosional remnants and pockets evolving from biotic-physical interactions in a Recent lower supratidal environment. *Sedimentary Geology* 123, 175- 181.
- Noffke, N., 2007. Microbially induced sedimentary structures in Archean sandstones: a new window into early life. *Gondwana Research* 11, 336-342.
- Noffke, N., 2010. *Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archean Era to Today*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 200.
- Noffke, N. y Krumbein, W., 1999. A quantitative approach to sedimentary surface structures contoured by the interplay of microbial colonization and physical dynamics. *Sedimentology* 46, 417-426.

- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T. y Krumbein, W.E., 2001a. Microbially induced sedimentary structures-a new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research* 71, 649-656.
- Noffke, N., Gerdes, G., Klenke, T. y Krumbein, W.E., 2001b. Microbially induced sedimentary structures indicating climatological, hydrological and depositional conditions within Recent and Pleistocene coastal facies zones (southern Tunisia). *Facies* 44, 23-30.
- Noffke, N., Knoll, A. y Grotzinger, J., 2002. Sedimentary controls on the formation and preservation of microbial mats in siliciclastic deposits: A case study from the Upper Neoproterozoic Nama Group, Namibia. *Palaios* 17, 533-544.
- Noffke, N., Gerdes, G. y Klenke, T., 2003. Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic). *EarthScience Reviews* 62, 163-176.
- Noffke, N., Beukes, N., Gutzmer, J. y Hazen R., 2006a. Spatial and temporal distribution of microbially induced sedimentary structures: A case study from siliciclastic storm deposits of the 2.9 Ga Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Precambrian Research* 146, 35-44.
- Noffke, N., Eriksson, K. A., Hazen, R.M. y Simpson, E.L., 2006b. A new window into Early Archean life: Microbial mats in Earth's oldest siliciclastic tidal deposits (3.2 Ga Moodies Group, South Africa). *Geology* 34, 253-256.
- Noffke, N., Beukes, N., Bower, D., Hazen, R.M. y Swift, D.J., 2008. An actualistic perspective into Archean worlds: (cyano-) bacterially induced sedimentary structures in the siliciclastic Nhlazatse Section, 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geobiology* 6, 5-20.
- Obermeier, S.F., 1996. Use of liquefaction-induced features for paleoseismic analysis. *Engineering Geology* 44, 1-76.
- Owen, G. y Moretti, M., 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology* 235, 141-147.
- Paerl, H. W., Fulton, R. S., Moisander, P. H. y Dyble, J., 2001. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *The Scientific World Journal* 1, 76-113.
- Pan, J., Cuadrado, D.G. y Bournod, C. N., 2017. Diatom-driven colonization of microbial mat-dominated siliciclastic tidal flat sediments. *FEMS Microbiology Ecology* 93, 1-13.

- Paterson, D.M., 1994. Microbiological mediation of sediment structure and behaviour. In: Stal, L.J., Caumette, P. (Eds.), *Microbial Mats*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 97-109.
- Pentecost, A. y Bauld, J., 1988. Nucleation of calcite on the sheaths of cyanobacteria using a simple diffusion cell. *Geomicrobiology Journal* 6, 129-135.
- Perillo, G.M.E., 2009. Tidal courses: classification, origin and functionality. In: Perillo, G.M.E., Wolanski, E., Cahoon, D.R., Brinson, M.M. (Eds.), *Coastal Wetlands an Integrated Ecosystem Approach*. Elsevier, The Netherlands, pp. 185-209.
- Petrisor, A. I., Kawaguchi, T. y Decho, A. W., 2004. Quantifying CaCO₃ microprecipitates within developing surface mats of marine stromatolites using GIS and digital image analysis. *Geomicrobiology Journal*, 21, 491-496.
- Prave, A. R., 2002. Life on land in the Proterozoic: evidence from the Torridonian rocks of northwest Scotland. *Geology* 30, 811-814.
- Pruss, S. B. y Bottjer, D. J., 2004. Early Triassic trace fossils of the western United States and their implications for prolonged environmental stress from the end-Permian mass extinction. *Palaios* 19, 551-564.
- Quijada, I.E., Cuadrado, D.G., Maisano, L. y Pan, J., 2017. Carbonate precipitation in microbial mats developed in a siliciclastic coastal environment. 33rd International Meeting of Sedimentology. IAS Abstract 734, Toulouse, Francia.
- Reid, R. P., Macintyre, I. G., Browne, K. M., Steneck, R. S. y Miller, T., 1995. Modern marine stromatolites in the Exuma Cays, Bahamas: uncommonly common. *Facies* 33, 1-17.
- Reid, R. P., Visscher, P. T., Decho, A. W., Stolz, J. F., Bebout, B. M. y Dupraz, C., 2000. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites. *Nature* 406, 989-992.
- Riding, R., 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and *biofilms*. *Sedimentology* 47, 179-214.
- Riding, R., 2006. Cyanobacterial calcification, carbon dioxide concentrating mechanisms, and Proterozoic-Cambrian changes in atmospheric composition. *Geobiology* 4, 299-316.
- Sarkar, S., Bose, P. K., Samanta, P., Sengupta, P. y Eriksson, P. G., 2008. Microbial mat mediated structures in the Ediacaran Sonia Sandstone, Rajasthan, India, and their implications for Proterozoic sedimentation. *Precambrian Research* 162, 248-263.

- Schieber, J., 1999. Microbial Mats in Terrigenous Clastics: The Challenge of Identification in the Rock Record. *Palaios* 14, 3-12.
- Schieber, J., 2004. Microbial mats in the siliciclastic rock record: a summary of diagnostic features. In: Eriksson, P.G., Altermann, W., Nelson, D., Mueller, W. U., Catuneanu, O., Strand, K. (Eds.), *The Precambrian Earth: Tempos and Events, Developments in Precambrian Geology*, Elsevier, pp. 663-272.
- Schieber, J., Bose, P.K., Eriksson, P.G., Banerjee, S., Sarkar, S., Altermann, W. y Catuneanu, O. (Eds), 2007. *Atlas of Microbial Mat Features Preserved Within the Clastic Rock Record*. Elsevier, Amsterdam, 324 pp.
- Shanmugam, G., 2017. Global case studies of soft-sediment deformation structures (SSDS): Definitions, classifications, advances, origins, and problems. *Journal of Paleogeography* 6, 251-320.
- Stanier, R.Y., 1977. The position of the cyanobacteria in the world of phototrophs: *Carlsberg Research Communications* 42, 77-98.
- Stal, L.J., 2000. Microbial mats and stromatolites. In: Whitton, B.A., Potts, M. (Eds.), *The Ecology of Cyanobacteria. Their Diversity in Time and Space*. Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 61-120.
- Stal, L. J., 2012. Cyanobacterial mats and stromatolites. In: *Ecology of cyanobacteria II*, Springer, Dordrecht, pp. 65-125.
- Stal, L.J., Van Gemerden, H. y Krumbein, W.E., 1985. Structure and development of a benthic marine microbial mat. *FEMS Microbiology Letters* 31, 111-125.
- Sutherland, I., 2001. *Biofilms* exopolysaccharides: a strong and sticky framework. *Microbiology* 147, 3-9.
- Teasdale, P.R., Minett, A.I., Dixon, K., Lewis, T.W. y Batley, G.E., 1998. Practical improvements for redox potential (EH) measurements and the application of a multiple-electrode redox probe (MERP) for characterising sediment in situ. *Analytica Chimica Acta* 367, 201- 213.
- Teruggi, M.E., Etchichury, M.C. y Remiro, J.R., 1957. Estudio sedimentológico de los terrenos de las barrancas entre Mar del Plata y Miramar. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales Bernardino Rivadavia* 4.
- Tice, M. M. y Lowe, D. R., 2004. Photosynthetic microbial mats in the 3,416-Myr-old ocean. *Nature* 431, 549-552.

- Trebino, L. G., 1987. Geomorfología y evolución de la costa en los alrededores del pueblo de San Blas, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 42, 9-22.
- Tonni, E.P., Cione, A.L. y Figini, A.J., 1999. Predominance of arid climates indicated by mammals in the pampas of Argentina during the Late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 147, 257-281.
- Underwood, G. J. y Paterson, D. M., 2003. The importance of extracellular carbohydrate production by marine epipelagic diatoms. *Advances in Botanical Research* 40, 183-240.
- Usiglio, J., 1849. Analyse de l'eau de la Méditerranée sur les cotes de France. *Annales de Chimie et de Physique* 3^{ème} sér 27, 92-107.
- Visscher, P. T. y Stolz, J. F., 2005. Microbial mats as bioreactors: populations, processes, and products. In: *Geobiology: Objectives, Concepts, Perspectives*, pp. 87-100.
- Wetherbee, R., Lind, J.L., Burke, J. y Quatrano, R.S., 1998. The first kiss: establishment and control of initial adhesion by raphid diatoms. *Journal of Phycology* 34, 9-15.
- Witte, L., 1916. Estudios geológicos de la región de San Blas. *Revista del Museo de La Plata* XXIV, serie II, La Plata. pp. 99.
- Yallop, M.L., De Winder, B., Paterson, D.M. y Stal, L.J., 1994. Comparative structure, primary production and biogenic stabilization of cohesive and non-cohesive marine sediments inhabited by microphytobenthos. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 39, 565-582.
- Yechieli, Y. y Wood, W., 2002. Hydrogeologic processes in saline systems: playas, sabkhas, and saline lakes. *Earth-Science Reviews* 58, 343-365.
- Zavala, C., Grill, S., Martínez, D., Ortiz, H. y González, R., 1992. Análisis paleoambiental de depósitos cuaternarios. Sitio paleoicnológico Monte Hermoso I, Provincia de Buenos Aires. *3^{ras} Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses Actas*: 31- 3, La Plata.