



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Diseño de un prototipo de robótica suave, para uso en misiones de rescate, con superficies texturadas bioinspiradas en el callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*

Design of a soft robotics prototype, for use in rescue missions, with bio-inspired textured surfaces based on the nuptial callus of the *Lithobates vibicarius*

Tesis de Licenciatura en Ingeniería Mecánica

María Fernanda Abarca Jiménez B50013


Sede Universitaria Rodrigo Facio

2023


Esta página fue intencionalmente dejada en blanco

Hoja de tribunal


Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.




Director de la Unidad Académica
Dr. Pietro Scaglioni Solano
Director Escuela de Ingeniería Mecánica



Asesora directora
Dra. Hennis Cavallini Solano
Escuela de Ingeniería Mecánica



Asesor interno
Dr. Arnaldo Castro Castro
Escuela de Ingeniería Mecánica



Asesor externo
Lic. Jonathan Torres Rodríguez
Escuela de Artes Plásticas. Investigador IIArte



Docente curso Investigación Dirigida
Mag. Juan Gabriel Monge Gapper
Escuela de Ingeniería Mecánica



Ponente
María Fernanda Abarca Jiménez

Dedicatoria

Con amor,

a mi mamá **Ligia Jiménez Pérez,**

quien me ha apoyado toda mi vida de manera incondicional, impulsándome a ser mejor, siendo la persona cuyo ejemplo ha influido mayormente en la mujer que soy ahora.

A mi hermano **Javier,**

por estar siempre presente en mi vida, pasar tanto tiempo conmigo y preocuparse por mi bienestar.

A mi hermano **Emmanuel,**

quien me ha mostrado lo bueno y divertido que es ser uno mismo, sin preocuparse por lo que opinen los demás.

A mi abuela **Blanca Rosa** y a mi tío **Edwin** en el cielo,

por su gran amor y cariño.

A mi profesora, asesora y amiga, **Hennia Cavallini Solano,**

una de mis inspiraciones como ingeniera y como mujer, con quien he trabajado desde hace años, compartiendo hermosos momentos y logros.

Y por última, pero no menos importante,

a quien siempre intenta dar lo mejor de ella, **a mí misma.**

Agradecimientos

- A mi familia y amigos, por su apoyo a lo largo de mi carrera y el desarrollo de mi trabajo final de graduación.
- A la Dra. Hennia Cavallini Solano, por su orientación, motivación y por mostrarme un camino de la ingeniería mecánica que no conocía.
- Al Lic. Jonathan Torres Rodríguez, asesor de este trabajo, por compartir su conocimiento y mostrar siempre entusiasmo al trabajar.
- Al Dr. Arnoldo Castro Castro, asesor de este trabajo, por su ayuda y emoción mostrada siempre por el proyecto.
- Al Ing. Esteban Ramos González, por dar su evaluación al resultado final del proyecto, basada en su experiencia como parte del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica.
- A Fabrizio Salas Álvarez por su gran apoyo moral en la etapa final de mi tesis y las horas de desestrés jugando en línea.
- A Karen Sandí Ramírez, colega con quién llevé varios cursos y se volvió mi compañera irremplazable para realización de los trabajos, además de una amiga con la cual conversar amablemente.
- A Efraín Corrales Salazar, colega y amigo cuyas historias y anécdotas compartidas durante horas libres en la universidad nunca serán olvidadas.
- A la Ing. Rebeca Corrales Brenes, por su colaboración en este trabajo, las horas que compartimos trabajando en el LANOTEC y, su amistad.
- A Eduardo Alfaro Ureña; Esteban Picado Céspedes; Eduardo Rojas Rodríguez del taller de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica por su ayuda, disposición y enseñanzas.
- Al profesor José Rodríguez Porras, por su ayuda durante la realización de las pruebas del proyecto y sus enseñanzas.
- Al Dr. Sergio Paniagua Barrantes, por su asesoramiento al medir y analizar los ángulos de contacto de las disoluciones de linaza.
- Al Sr. Reinaldo Pereira Reyes, por su colaboración en la sesión de microscopía electrónica.
- Al Dr. José Roberto Vega Baudrit, director del LANOTEC, por facilitar el uso de las instalaciones para el desarrollo de este trabajo.
- Al LANOTEC, por acogerme durante mi práctica profesional y parte del desarrollo de este trabajo.

- Al Instituto de Investigaciones en Arte, por la colaboración en el proyecto.
- A la Universidad de Costa Rica y a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por la formación humana y profesional que me dieron.
- A todos los compañeros que tuve a lo largo de la carrera, con los cuales atravesé mis años de universidad.

“Algunas de las manualidades más exquisitas de la naturaleza están a una escala miniatura, como sabe quién haya mirado un copo de nieve a través de una lupa.”

Rachel Carson (1965)

Índice general

Hoja de tribunal	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Epígrafe	iv
Índice general	v
Índice de ilustraciones	vi
Índice de tablas	vii
Abreviaturas	viii
Resumen	ix
Abstract	x
Introducción	1
Descripción general	3
Objetivos	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Justificación	5
Antecedentes	6
Metodología	9
Primera Etapa: Caracterización de la Superficie	10
Segunda Etapa: Fluido de Adherencia	10
Tercera Etapa: Locomoción del prototipo	10
Cuarta Etapa: Selección de materiales para prototipado	11
Quinta Etapa: Prototipado	11
Sexta Etapa: Pruebas	11
Alcance y limitaciones	12
Marco teórico	13
Lithobates vibicarius	13

Piel del Anuro	14
Descripción del Callo Nupcial	15
Glándulas Mucosas	18
Adhesión de los Anuros	19
Superficies Bioinspiradas	21
Gecko	21
Anuros	22
Robótica Suave	23
Locomoción en Robótica Suave	24
Materiales Blandos para el Prototipado	25
Nanomanufactura	26
Litografía Suave	27
Sensibilidad Artística en el Diseño	27
Resultados y Análisis	30
Caracterización de las Superficies y diseño del patrón	30
Análisis Microscópico	41
Fluido de Adherencia	46
Linaza	47
Ángulos de contacto	48
Viscosidad	56
Fluido Seleccionado	58
Materiales para el prototipado	58
PLA	59
Resina Fotosensible	59
Caucho de Silicona	60
Diseño de Moldes	61
Moldes con canales	62
Moldes Biotexturales	65
Prototipado	67
Moldes	67

Moldes con canales	67
Moldes Biotexturales	68
Textura Bioinspirada	70
Canales de los Sistemas Fluídicos	73
Prototipo bioinspirado	73
Pruebas	75
Sistema Neumático	75
Humectabilidad	77
Adherencia	79
Avances en robótica suave y más allá	81
Conclusiones	85
Recomendaciones	87
Referencias bibliográficas	89
Apéndices	99
Apéndice 1	100
Apéndice 2	102
Apéndice 3	104
Apéndice 4	107
Apéndice 5	108
Apéndice 6	109
Apéndice 7	111
Apéndice 8	113
Apéndice 9	115
Apéndice 10	117
Apéndice 11	119
Apéndice 12	121

Índice de ilustraciones

Figura 1.1. <i>Diagrama de la sistematización de la metodología.</i>	...	9
Figura 2.1. <i>Espécimen de la <i>Lithobates vibicarius</i> adulta. Adaptado de “Amphibian Skin Microbiome and Its Interaction with <i>Batrachochytrium dendrobatidis</i>: Tools to Mitigate Chytridiomycosis in Costa Rica”, por R. Jiménez Quirós. Producido por G. Alvarado, 2016, <i>Amphibians</i>. Copyright 2016 por The Rufford Foundation.</i>	...	13
Figura 2.2. <i>Células hexagonales cubiertas por queratina del palmar de la <i>Lithobates vibicarius</i> fotografiadas con el microscopio electrónico de barrido. Fuente: Flores-Fourier, 2020.</i>	...	15
Figura 2.3. <i>Ultraestructura obtenida de una <i>Lithobates vibicarius</i>, con presencia de formaciones celulares queratinizadas en formaciones hexagonales, cuyo ángulo preferencial de direccionalidad es de 60 grados en las zonas ventrales y b) una estructura compuesta de protuberancias papiladas, encontradas en el callo nupcial. Fuente: Flores-Fourier, 2020.</i>	...	16
Figura 2.4. <i>Rosetas o protuberancias papiladas presentes en el callo nupcial de la <i>Lithobates vibicarius</i>. Fuente: Flores-Fourier, 2020.</i>	...	16
Figura 2.5. <i>Protuberancia papilada. a) Vista de roseta central de la protuberancia. b) Vista frontal de filamentos. c) Vista lateral de filamentos. Fuente: Flores-Fourier, 2020.</i>	...	17
Figura 2.6. <i>Ángulo preferencial del mapa textural básico del callo nupcial de la <i>Lithobates vibicarius</i>. Fuente: Flores-Fourier, 2020.</i>	...	18
Figura 2.7. <i>Glándula mucosa en meseta de tejido imbricado. Fuente: Flores-Fourier, 2020.</i>	...	18
Figura 2.8. <i>Vista de las glándulas en células epiteliales. Fuente: Flores-Fourier, 2020.</i>	...	19
Figura 2.9. <i><i>Lithobates vibicarius</i> adheridas durante el amplexo. Fuente: Wainwright & Gray, 2009.</i>	...	21
Figura 2.10. <i>Micrografías de la morfología presente en el dedo de un gecko, en específico las filas de setae, un setae presentado individualmente y varios spatulae. Fuente: Autumn et al., 2000.</i>	...	22

Figura 2.11. Robot “Cachorro”, proyecto de robótica suave cuya locomoción sucede a través de cables. Fuente: Bern et al., 2019.	...	24
Figura 2.12. Robot multipaso de accionamiento neumático basado en los actuadores McKibben. Fuente: Shepherd et al., 2011.	...	25
Figura 2.13. Biotextura de dioscorea alata fotografiada con el microscopio electrónico de barrido. Tomada por Andrea Bogantes Retana, estudiante del curso Biomimética de la Universidad de Costa Rica.	...	28
Figura 2.14. Producto del biomodelaje digital de la biotextura de la dioscorea alata trabajada con el programa Rhinoceros 3D. Cortesía de Jonathan Torres Rodríguez, artista escultor egresado de la Universidad de Costa Rica.	...	29
Figura 3.1. Vista superior de los filamentos queratinizados presentes en las protuberancias papiladas del callo nupcial de la <i>Lithobates vibicarius</i> , por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.	...	31
Figura 3.2. Vista del perfil de los filamentos queratinizados presentes en las protuberancias papiladas del callo nupcial de la <i>Lithobates vibicarius</i> , por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.	...	32
Figura 3.3. Boceto del filamento queratinizado con las dimensiones promedio originales. Elaboración propia en el sitio web diagrams.net , 2022.	...	32
Figura 3.4. Modelado tridimensional del filamento queratinizado. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.	...	33
Figura 3.5. Conglomerados de filamentos queratinizados presentes en el palmar de la <i>Lithobates vibicarius</i> , por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.	...	33
Figura 3.6. Bocetos de los conglomerados de filamentos a utilizar en el diseño del patrón de la biotextura. Elaboración propia en el sitio web diagrams.net , 2022.	...	34
Figura 3.7. Modelos de los conglomerados de filamentos. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.	...	34
Figura 3.8. Células hexagonales cubiertas por queratina del palmar de la <i>Lithobates vibicarius</i> , por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.	...	35
Figura 3.9. Espesores de los canales que rodean las células hexagonales, por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.	...	35

Figura 3.10. <i>Boceto de la distribución de los conglomerados de los filamentos queratinizados en el panel hexagonal. Elaboración propia en el sitio web diagrams.net, 2022.</i>	...	36
Figura 3.11. <i>Vista de la altura de las células hexagonales presentes en el palmar, por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.</i>	...	36
Figura 3.12. <i>Modelo tridimensional de celda bioinspirada con los conglomerados colocados de manera aleatoria. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	37
Figura 3.13. <i>Primer prototipado 3D en resina a diferentes escalas de la celda bioinspirada ensamblado en un conjunto de siete: a) Escalas al 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 70% y, 100% (De izquierda a derecha); b) Detalle de la impresión a escalas de 5%, 10%, 20% y 30%; c) Detalle del ensamble a escala base (100%). Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.</i>	...	38
Figura 3.14. <i>Modelado tridimensional del filamento queratinizado con profundidad duplicada y espesor de pared reducido a la mitad. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	38
Figura 3.15. <i>Celda bioinspirada modelada tridimensionalmente con el filamento queratinizado con profundidad duplicada y espesor de pared reducido a la mitad. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	39
Figura 3.16. <i>Canales y mesetas presentes en el palmar de la Lithobates vibicarius, por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.</i>	...	39
Figura 3.17. <i>Ensamble tridimensional con separación entre celdas con ventosas acentuadas y mesetas. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	40
Figura 3.18. <i>Segundo prototipado 3D en resina a diferentes escalas de las agrupaciones celulares con ventosas de los filamentos acentuadas, ensamblado tomando en cuenta los canales y las mesetas. Escalas al 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 70% y, 100% (De izquierda a derecha). Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.</i>	...	40
Figura 3.19. <i>Tercera impresión 3D en resina a diferentes escalas de las celdas bioinspiradas con ventosas de los filamentos acentuadas ensamblado tomando en cuenta los canales y las mesetas. Escalas al 200% y 150% (De izquierda a derecha). Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.</i>	...	41
Figura 3.20. <i>Celda bioinspirada con ventosas de los filamentos acentuadas a escala del 200%. Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.</i>	...	41

Figura 3.21. Cobertor Iónico (Denton Vacuum Desk V) utilizado para la preparación de la celda bioinspirada para su visualización en el microscopio electrónico de barrido.	...	42
Figura 3.22. Celda bioinspirada impresa en resina dentro del cobertor iónico: a) Durante el proceso de cobertura, b) Al finalizar el proceso de cobertura.	...	42
Figura 3.23. Microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6390LV.	...	43
Figura 3.24. Celda bioinspirada montada en el microscopio electrónico de barrido listo para su visualización.	...	43
Figura 3.25. Morfología del costado de la celda hexagonal con meseta. a) vista parcial lateral-superior y, b) espesor de la celda bioinspirada. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.	...	43
Figura 3.26. Morfología superior de la impresión 3D en resina de los conglomerados de a) tres filamentos, b) cuatro filamentos y, c) cinco filamentos. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.	...	44
Figura 3.27. Imperfección presente en la ventosa del conglomerado de tres filamentos. a) Vista superior del conglomerado, b) Vista superior de uno de los filamentos con la imperfección, c) agujero presente en la ventosa del filamento y, d) interior del agujero. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.	...	45
Figura 3.28. Detalle de la impresión de las ventosas de la celda bioinspirada en resina. a) conglomerado de cinco filamentos, b) filamentos, c) ventosa presente en el filamento y, d) magnificación de la ventosa. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.	...	46
Figura 3.29. Imperfecciones halladas en la celda producida con impresión 3D con resina. a) Agujeros, b) rayones y descamamiento, c) bordes rugosos y, d) desprendimiento de material. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.	...	46
Figura 3.30. Proceso de preparación de las tres disoluciones de linaza en agua destilada.	...	47
Figura 3.31. Representación esquemática de una gota sésil de líquido (L), reposando en equilibrio sobre una superficie sólida horizontal (S) en una atmósfera de gas (G), con el ángulo de contacto (θ) y tensiones en el punto triple (γ). Fuente: Rodríguez-García-Cebadera, 2010.	...	49

Figura 3.32. <i>Goniómetro de la marca Ramé-hart, modelo 250-F1.</i>	...	49
Figura 3.33. <i>Máquina de limpieza por ultrasonido marca Branson modelo 2510 (Izquierda) y placa de acero 304 dentro de tubo falcón (derecha).</i>	...	49
Figura 3.34. <i>Micropipeta configurada para trabajar con un volumen de 5 μL (Izquierda) y las puntas de micropipeta empleadas para cada fluido (derecha).</i>	...	50
Figura 3.35. <i>Colocación de la gota en el goniómetro utilizando la micropipeta (Izquierda) y gota sobre la placa de acero 304 (derecha).</i>	...	50
Figura 3.36. <i>Captura de pantalla de una gota en el goniómetro siendo visualizada en el programa DROPImage Advanced.</i>	...	51
Figura 3.37. <i>Captura de pantalla de la medición de ángulo con el programa ImageJ.</i>	...	51
Figura 3.38. <i>Placa de acero 304 dentro del cobertor iónico antes (Izquierda) y durante su cobertura con plasma (derecha).</i>	...	54
Figura 3.39. <i>Veronicella floridana en movimiento dibujada a partir de una fotografía por Cook (1987).</i>	...	62
Figura 3.40. <i>Bosquejo con las dimensiones para el molde del prototipo. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	62
Figura 3.41. <i>Diseño de los canales de aire. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	63
Figura 3.42. <i>Diseño final del molde con canales para el sistema neumático. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	63
Figura 3.43. <i>Diseño de los canales para la mucosa. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	64
Figura 3.44. <i>Diseño final del molde con canales para el sistema neumático y para el sistema de humectación. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	64
Figura 3.45. <i>Modelo de la superficie texturada deseada. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	65

Figura 3.46. <i>Molde biotextural en negativo con las dimensiones del prototipo. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	66
Figura 3.47. <i>Espesor de las paredes internas y externas del molde biotextural. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	66
Figura 3.48. <i>Molde biotextural. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.</i>	...	66
Figura 3.49. <i>Molde con canales para sistema neumático y de humectación impreso: con imperfectos (izquierda) y con sus agujeros rellenos de goma (derecha).</i>	...	68
Figura 3.50. <i>Moldes con canales impresos: vacíos (izquierda) y con la silicona de platino (derecha). Elaboración propia con la impresora de filamento Anycubic Chiron, 2022.</i>	...	68
Figura 3.51. <i>Molde biotextural en negativo impreso. Elaboración propia con la impresora de resina Phrozen Sonic Mini 4K, 2022.</i>	...	69
Figura 3.52. <i>Acercamiento al molde biotextural impreso: lleno de alcohol isopropílico para posteriormente remover el material residual (izquierda) y después de remover el material residual (derecha). Elaboración propia con la impresora de resina Phrozen Sonic Mini 4K, 2022</i>	...	69
Figura 3.53. <i>Molde de resina preparado según el protocolo con el caucho de silicona vertido.</i>	...	70
Figura 3.54. <i>Pieza de caucho de silicona lograda con el molde biotextural.</i>	...	70
Figura 3.55. <i>Detalles del molde de silicona biotextural: a) Pared interna en uno de los extremos; b) Vista lateral; c) Acercamiento con detalle de los filamentos; d) vista superior de la superficie.</i>	...	71
Figura 3.56. <i>Molde de silicona rodeado de cinta para embalaje.</i>	...	71
Figura 3.57. <i>Molde de silicona rodeado de cinta para embalaje y cubierto de vaselina: sin el caucho de silicona chorreado (izquierda) y, con el fluido vertido (derecha).</i>	...	72
Figura 3.58. <i>Superficie con textura bioinspirada en la Lithobates vibicarius: a) visualización de un extremo y el espesor de capa; b) detalle de las celdas bioinspiradas centrales; c) vista superior.</i>	...	72

Figura 3.59. <i>Capa con los canales para el sistema neumático y para el sistema de humectación: vista superior a los canales (izquierda) y, vista inferior (derecha).</i>	...	73
Figura 3.60. <i>Elementos seleccionados para la conformación de los sistemas fluídicos: jeringa de bulbo con manguera para enema (izquierda), manguera médica con regulador de flujo (centro) y, perilla con válvula de alivio de un esfigmomanómetro (derecha).</i>	...	74
Figura 3.61. <i>Revisión visual del sellado de los conductos de aire durante el ensamble del prototipo.</i>	...	75
Figura 3.62. <i>Prototipo de robótica suave con superficie texturada bioinspirada en la Lithobates vibicarius finalizado.</i>	...	75
Figura 3.63. <i>Desplazamiento angular alcanzado por el prototipo.</i>	...	76
Figura 3.64. <i>Diagrama de un elipsoide horizontal. Elaboración propia.</i>	...	76
Figura 3.65. <i>Deformación celular y de membrana plasmática en el prototipo.</i>	...	77
Figura 3.66. <i>Prueba de humectabilidad de los canales del sistema neumático: a) 0 segundos; b) 15 segundos; c) 30 segundos.</i>	...	78
Figura 3.67. <i>Prueba de humectabilidad de los canales del sistema de humectación: a) 0 segundos; b) 4 segundos; c) 8 segundos; d) 10 segundos.</i>	...	78
Figura 3.68. <i>Prueba de humectabilidad de la agrupación celular: a) 0 segundos; b) 5 segundos; c) 11 segundos.</i>	...	79
Figura 3.69. <i>Variación del ángulo de rotación hasta alcanzar el movimiento inminente.</i>	...	79
Figura 3.70. <i>Diagrama de cuerpo libre del prototipo bioinspirado en el ángulo de deslizamiento inminente: mostrando el prototipo en el vidrio (izquierda) y, con los ejes X y Y definidos (derecha).</i>	...	80
Figura 3.71. <i>Bótsbòts klò sobre una lámina metálica arqueada; sin flujo de aire (izquierda) y, con aire fluyendo internamente (derecha).</i>	...	82
Figura 3.72. <i>Bótsbòts klò en: un lugar confinado con obstáculos (izquierda) y, sobre un terreno irregular elevado (derecha).</i>	...	83

Índice de tablas

Tabla 2.1. Taxonomía de la <i>Lithobates vibicarius</i>	14
Tabla 3.1. Porcentajes de masa entre volumen de las disoluciones de linaza.	...	48
Tabla 3.2. Ángulos de contacto obtenidos de las disoluciones de linaza y agua, en acero 304 limpio con acetona por 5 minutos en lavado ultrasónico, secado con aire comprimido.	...	52
Tabla 3.3. Ángulos de contacto obtenidos de las disoluciones de linaza y agua, en acero 304 limpio con acetona por 5 minutos en lavado ultrasónico, secado con aire comprimido y cubierto con plasma.	...	53
Tabla 3.4. Identificación del orden de los sets utilizados en las pruebas ANOVA y Tukey.	...	54
Tabla 3.5. Ángulos de contacto promedio y desviaciones estándar de los fluidos ensayados sobre la placa de acero 304 limpia sin cubrir de plasma.	...	55
Tabla 3.6. Ángulos de contacto promedio y desviaciones estándar de los fluidos ensayados sobre la placa de acero 304 limpia cubierta de plasma.	...	56
Tabla 3.7. Datos de viscosidad dinámica de las disoluciones de linaza.	...	57
Tabla 3.8. Propiedades mecánicas del PLA blanco.	...	59
Tabla 3.9. Propiedades mecánicas de la resina Phrozen Aqua 4K - Gris.	...	60
Tabla 3.10. Propiedades mecánicas de la silicona de platino Ecoflex 00-50, marca Smooth-On.	...	61
Tabla 3.11. Dimensiones de la perilla con válvula de alivio.	...	76

Abreviaturas

3D Tres Dimensiones.

AFM Microscopio de fuerza atómica (Atomic Force Microscopy).

FDM Modelado por deposición fundida (Fused Deposition Modeling).

HSD Diferencia Honestamente Significativa de Tukey (Honestly Significant Difference).

IIArte Instituto de Investigaciones en Arte.

LANOTEC Laboratorio Nacional de Nanotecnología.

MEB Microscopio electrónico de barrido.

PLA Ácido poliláctico (Polylactic acid).

PUFAs Ácidos grasos poliinsaturados (Polyunsaturated Fatty Acids).

SAR Búsqueda y rescate (Search and Rescue).

SEM Microscopio electrónico de barrido (Scanning Electron Microscope)

SLA Estereolitografía (Stereo Lithography Appearance).

UAV Vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles).

UGV Vehículos terrestres no tripulados (Unmanned Ground Vehicle).

UICN Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (International Union for Conservation of Nature).

UV Ultravioleta.

Resumen

Este proyecto desarrolló un robot suave llamado Bótsbòts klò, utilizando las palabras bribri “pegajoso” y “pata”, con una superficie texturada inspirada en el callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*. Su diseño considera el acceso a sitios difíciles de alcanzar y su posible uso como herramienta para equipos de rescate en escenarios de emergencia. Más bioinspiración es usada en el diseño del cuerpo del Bótsbòts klò, su sistema neumático y, su sistema de humectación. El cuerpo y el sistema neumático se integraron exitosamente, logrando la capacidad motora del robot. Por otro lado, pese a haber inconvenientes en el sistema de humectación, el proyecto asentó las bases para desarrollar un sistema funcional de segregación de la mucosa.

El prototipo es capaz de deformarse en respuesta a cambios en la presión, teniendo un desplazamiento angular de 35° cuando se bombean 0.00081 m^3 de aire. Se probó su capacidad de adhesión a superficies, resultando en que puede adherirse al vidrio hasta un ángulo de 47° . El Bótsbòts klò soporta un esfuerzo de adhesión máximo de 5939.40 Pa , con un esfuerzo cortante de 4333.33 Pa y un esfuerzo de tensión de 4060.61 Pa .

Una celda bioinspirada y una agrupación celular son diseñadas paralelamente con los moldes necesarios para la fabricación del robot texturado. El proyecto diseñó y prototipó exitosamente una superficie textural bioinspirada, la cual resultó generalmente satisfactoria, a pesar de tener algunas imperfecciones. Adicionalmente, se desarrolló una metodología para la generación de prototipos biotexturados.

Además, se caracterizaron tres disoluciones de linaza a diferentes proporciones, las cuales se compararon con la mucosa segregada por las ranas para determinar el fluido más apto para asemejar la mucosa. También, se destaca el uso específico de las capacidades de adhesión estudiadas de la *Lithobates vibicarius* para el diseño de biotexturas con alta capacidad de adhesión.

Cítese este trabajo como:

Abarca-Jiménez, M.F. (2023). *Diseño de un prototipo de robótica suave, para uso en misiones de rescate, con superficies texturadas bioinspiradas en el callo nupcial de la Lithobates vibicarius*. (Trabajo final de graduación de Licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

Abstract

This project developed a soft robot named Bótsbòts klò using the bribri language words for "sticky" and "leg", with a textured surface inspired by *Lithobates vibicarius* nuptial callus. The design considers accessing hard-to-reach places, and its possible use as a tool for rescue teams in emergency scenarios. More bioinspiration is used in the design of the Bótsbòts klò's body, pneumatic system, and moisturizing system. The body and pneumatic system were successfully integrated, resulting in the robot's motor capability. On the other hand, although there were some design issues with the moisturizing system, the project laid the foundation for developing a functional design for the segregation of mucus.

The prototype is able to deform in response to changes in air pressure, having an angular displacement of 35° when 0.00081 m^3 of air is pumped. Its ability to adhere to surfaces was tested, resulting that it can adhere to glass at an angle of up to 47° . The Bótsbòts klò was found to resist a maximum adhesion stress of 5939.40 Pa , with a shear stress of 4333.33 Pa , and a tensile stress of 4060.61 Pa .

A bioinspired cell and a cell group were designed together with the molds needed for the textured robot fabrication. The project successfully designed and prototyped a bioinspired textured surface, which was generally satisfactory despite some imperfections. In addition, a methodology was developed for generating biotextured prototypes.

Moreover, three linseed solutions at different proportions were characterized and compared with the mucus secreted by the frogs to determine the most suitable solution to resemble the mucus. The specific use of the adhesion capacities studied in *Lithobates vibicarius* anurans is highly recommended for the design of biotextures with high adhesion capacity.

Cite this work as:

Abarca-Jiménez, M.F. (2023). *Diseño de un prototipo de robótica suave, para uso en misiones de rescate, con superficies texturadas bioinspiradas en el callo nupcial de la Lithobates vibicarius*. (Final degree graduation project). University of Costa Rica. San José, Costa Rica.

Capítulo 1

1. Introducción

Los autores Gulati et al. (2011), introducen su documento comentando sobre el interés que ha surgido en los cuerpos de rescate a raíz de la “inesperada magnitud y escala de los desastres naturales u ocasionados por el hombre”, de buscar equipos nuevos e innovadores que mejoren su eficiencia. Diferentes escenarios como lo son los terremotos, tsunamis, derrumbes y similares, resultan en deber realizar tareas en sitios difíciles de acceder y navegar, lo que resulta en un desempeño tardío, en ocasiones con consecuencias críticas.

Toscano-Moreno et al. (2018) mencionan que, ante las situaciones de emergencia se requiere de “una intervención rápida para la atención a las víctimas, así como una reducción del riesgo para los miembros del equipo de rescate”. En estos casos, “el desarrollo de sistemas robóticos y mecatrónicos con ciertas capacidades inteligentes tiene un enorme potencial en escenarios de crisis” (Toscano-Moreno et al, 2018).

Antes, las búsquedas eran realizadas por humanos acompañados por perros entrenados para el rescate, esto tenía dos principales desventajas. Primeramente, se tenía lidiar con el tiempo que debía invertirse en la exploración, a veces siendo malgastado en sitios donde no había nada, y también, había inconvenientes con ciertas zonas a las que era necesario acceder, pero resultaba difícil incluso para una persona o un perro de rescate (Gulati et al., 2011).

En la actualidad hay dos sistemas robóticos que se destacan entre los utilizados como herramientas ante situaciones de emergencia, los vehículos terrestres no tripulados (Unmanned Ground Vehicle (UGV)) y los vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles (UAV)) conocidos también como drones. Los UGV se han usado para el rescate y atención de víctimas (Toscano-Moreno et al, 2018) y, los aéreos no tripulados se utilizan en exploración y detección humana por medio de imágenes (Rosero, 2019). Ambos dispositivos siendo de gran utilidad en las misiones de búsqueda y rescate (Search and Rescue (SAR)), logrando la preservación de vidas humanas afectadas por desastres naturales u otras situaciones que las han puesto en peligro.

Sin embargo, tal y como mencionan Rieffel & Trimmer (2010), los últimos desastres ocurridos han dirigido la búsqueda a la fabricación de equipos más versátiles con

posibilidades de introducirse en agujeros, escalar paredes y fluir alrededor de obstáculos. El avance en el desarrollo de materiales suaves a lo largo de los años, ha ido volviendo esto en una realidad cada vez más alcanzable, dirigiéndose al área de la robótica suave.

Muchas veces inspirados en la misma naturaleza, los proyectos relacionados con robots de características blandas aprovechan capacidades de deformación o alteraciones en la forma, en conjunto con funcionalidades sensoriales o de movimiento para poder realizar tareas en diferentes entornos. Paralelamente se sabe que, el desarrollo de dispositivos como estos conlleva desafíos como lo son el cómo diseñarlos y el cómo controlarlos (Rieffel & Trimmer, 2010), razón por lo cual más aportes en esta área son necesarios.

1.1. Descripción general

Las situaciones de emergencia ocurren inesperadamente y de manera tan expedita que hacen crucial la toma de decisiones, implicando también la selección de equipo que facilite maniobras que una persona sola no puede realizar. Ante derrumbes o colapsos estructurales, por ejemplo, surge muchas veces la necesidad de barrer zonas difíciles, áreas a las cuales puede ser complicado para una persona acceder y, es necesario explorar con el fin de detectar mayores daños o incluso salvar personas.

La intención de este proyecto radica en el desarrollo de una metodología para la conformación y adaptación de materiales, que permitan el diseño de un prototipo de robótica suave, es decir un robot de naturaleza blanda que pueda ser utilizado en misiones de rescate y, tenga la capacidad de adherirse a superficies que presenten diferentes rangos de gradeabilidad. Para lograr el objetivo se sistematizará un estudio de proyectos similares, incorporando diseños bioinspirados y la experiencia empírica de un artista. Posteriormente, en base a lo analizado se procederá al prototipado del elemento blando y a la realización de sus respectivas pruebas.

En específico, la metodología a trazar será para la conformación de nuevos materiales bioinspirados y su incorporación al mundo de la robótica suave, fungiendo como una etapa inicial para la implementación de las biotexturas de dicho anuro en elementos con alta capacidad de adhesión. En este caso, como una herramienta que facilitará las acciones de rescate en edificaciones e incrementará la probabilidad de salvar vidas en condiciones de riesgo ocasionadas por catástrofes.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un elemento flexible adaptable a robótica suave, con superficies texturadas inspiradas en el callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*, que permita adherencia anisotrópica y que tenga la capacidad de acceder a lugares de difícil acceso.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los patrones texturales adecuados y especificaciones necesarias para su implementación en el diseño.
- Identificar características relevantes del fluido a utilizar para propiciar la adherencia y seleccionar aquel que facilite su movilidad en diferentes tipos de superficie.
- Elegir los materiales de naturaleza blanda más adecuados para su uso en el diseño.
- Prototipar los patrones de adherencia en superficies blandas incorporando el fluido elegido.

1.3. Justificación

El desarrollo tecnológico actual ha facilitado en gran parte la vida diaria de las personas, sin embargo, pese a que la tecnología comparada con el siglo anterior ha evolucionado enormemente, existen varias problemáticas evidenciadas en caso de situaciones de emergencia. Al analizar los retos que se presentan en estos momentos tan críticos es donde se logra apreciar la necesidad de incorporar todos estos avances en la elaboración de herramientas que faciliten el trabajo del equipo especializado.

Para el caso del acceso a terrenos difíciles después de que alguna situación inesperada sucede, el problema está en contar con un equipo autosuficiente, que logre llegar a las zonas donde a una persona se le dificulta. Además, este dispositivo no solo debe llegar ahí, sino que debe contar con alguna utilidad que agilice o mejore la labor de los equipos de rescate.

El desarrollo de equipos de este tipo es un gran desafío, ya que cada funcionalidad que ofrezca debe ser rigurosamente diseñada. Es posible que se tenga una idea sobre cómo realizarlo, sin embargo, se deben de hacer las investigaciones y pruebas adecuadas. La presente propuesta pretende dar ese paso inicial hacia el desarrollo exitoso de un equipo idóneo para esta clase de trabajo.

Paralelamente, se ha observado que las características naturales de los animales para sobrevivir resultan una gran fuente de ideas; tomándolas de punto de partida se pueden llegar a encontrar las soluciones necesarias para abordar millones de problemas. La situación que se aborda en el presente documento no es la excepción, y esto es evidenciado en la forma en la que diferentes especies logran sobrevivir a desastres o incluso cotidianamente realizan sus actividades, de modo que resulta bastante conveniente la materialización de dichas ideas entremezcladas con los avances tecnológicos y en materiales que se han conseguido hasta la actualidad.

1.4. Antecedentes

Usualmente, la robótica se ha relacionado con estructuras de materiales rígidos, cumpliendo con sus funciones en ambientes controlados. Teniendo la desventaja de que, al momento de realizar sus labores en terrenos con condiciones variantes, estos tienden a disminuir su desempeño.

Observando la naturaleza, se ha visto cómo los animales utilizan estructuras suaves para movilizarse y desarrollarse eficientemente en diferentes medios. Situación que los ingenieros y diseñadores en robótica han ido implementando en nuevos prototipos. Producto de esta bioinspiración y del aprovechamiento de elementos blandos, surge una nueva ola en la robótica, la robótica suave (Kim, Laschi & Trimmer, 2013).

Según mencionan, Manti et al. (2015), hay dos enfoques que se consideran para una interacción suave entre una máquina y un objeto. El que suelen utilizar las máquinas de elementos rígidos, utilizando esquemas de control complejos y precisos o cambiando la rigidez de actuadores y, el de la robótica suave, el cual “explora las propiedades mecánicas intrínsecas del material blando” (Manti et al, 2015).

El diseño de sistemas robóticos de naturaleza blanda tiene el objetivo, según Kim y colaboradores (2013), de “dotar a los robots con nuevas capacidades bioinspiradas, que permitan interacciones adaptables y flexibles en entornos impredecibles”. Siendo seguros para su interacción con seres humanos e implementables de manera híbrida con la ingeniería de tejidos en aplicaciones médicas (Kim et al., 2013).

Como mencionan Henke et al. (2017), para producir robots enteramente suaves, con movimientos naturales similares a los de los animales, se deben integrar estructuras de control y actuación en el material suave. Lo anterior, ha sido uno de los grandes retos en el desarrollo de la robótica blanda, ya que actualmente muchos de los componentes necesarios para desarrollar el movimiento o el accionar buscado en el dispositivo son rígidos, lo cual se contrapone al objetivo inicial. Por dicha razón, estos autores introducen en el artículo unos elastómeros osciladores eléctricos suaves, como un avance en la búsqueda del desarrollo de componentes suaves para estos dispositivos.

Con respecto a su manufactura, Gul et al. (2018) dedicaron todo un artículo al uso de la impresión 3D para la fabricación de robots suaves, mencionando que su uso

se debe a “su alta calidad y a la capacidad de imprimir múltiples materiales al mismo tiempo”. También considerando relevante mencionar la libertad en el diseño que esta tecnología y sus avances ofrecen en la actualidad.

En el artículo, *A review of 3D printing processes and materials for soft robotics* (Yap et al., 2020), se abarcan cinco técnicas de impresión 3D y los materiales más utilizados en el proceso de elaboración de estos robots, detallando también las ventajas y desventajas de cada técnica. En este documento también se menciona la impresión en cuatro dimensiones, refiriéndose a la impresión en tres dimensiones de componentes inteligentes, hechos de materiales compuestos sensibles a estímulos o multimateriales con propiedades que cambian, “mostrando cambios físicos o químicos a través del tiempo al reaccionar ante ciertos estímulos”.

La movilidad del robot blando es otro de los desafíos que los investigadores se han propuesto vencer. Los que se han desarrollado hasta el momento, aunque son bastante orgánicos en su movimiento, todavía son lentos y muy controlados. Inspirados en el movimiento de los pulpos, los investigadores Cianchetti et al. (2015), construyen un robot suave de ocho tentáculos, para enfocarse en el estudio de su locomoción y agarre.

En su artículo, estos investigadores destacaron que el pulpo resulta sumamente interesante en el desarrollo de robots blandos por su “gran deformabilidad, destreza y rico repertorio de comportamiento” (Cianchetti et al, 2015). Se le realizaron pruebas bajo el agua, en movimiento y manipulando objetos.

Años más tarde, inspirados en la adaptabilidad de los pulpos, el Dr. Sareh et al. (2017), líder académico en robótica del Royal College of Art, y su equipo, han desarrollado un módulo de anclaje físico-sensorial. El prototipo realizado después de una extensa investigación sobre la estructura y propiedades mecánicas de las ventosas se construyó con materiales suaves y pegajosos, incluyendo sensores de fibra óptica.

En dicho trabajo, se lograron obtener valores de carga soportable por la ventosa artificial, presión de vacío y números de los módulos de anclaje en un sistema robótico. Fundamentando las bases para un futuro desarrollo de prototipos de locomoción con anclaje o manipulación robótica con múltiples ventosas para aplicaciones industriales y médicas (Sareh et al, 2017).

Siendo desde hace muchos años objeto de interés biomimético debido a su gran capacidad de adherencia, fue hasta hace algunas décadas que diferentes estudios han descubierto los mecanismos que el gecko utiliza para poder escalar por

diferentes superficies y quedarse adherido en ellas. Estos descubrimientos surgieron a partir de la continua mejora en las técnicas de microscopía electrónica y los sensores microfabricados (Li et al., 2016), resultando en la posibilidad actual de poder ver estructuras a escalas que antes ni se imaginaban, como lo son las estructuras setae y spatulae de escala micrométrica encontradas en la pata del gecko.

Recreando la morfología de la pata del gecko a escala macro, estudiantes de la Universidad de Akron crearon una cinta sintética a base de nanotubos de carbono. La misma resultó capaz de soportar esfuerzos cortantes de hasta 36 N/cm². Dicho valor es cuatro veces mayor al alcanzado por el gecko, y se adhiere a diferentes superficies incluidas el teflón. Logrando así, por primera vez, un adhesivo a escala macro que tiene la posibilidad de usarse varias veces después de zafarse, con propiedades adhesivas mayores a las del animal del que se basó (Ge et al., 2007).

Las bases para un estudio similar al anterior las plantea Flores-Fournier (2020), describiendo las ultraestructuras en los dígitos palmares de las especies de rana *Lithobates vibicarius* y *Agalychnis spurrelli*. Distinguiendo las capacidades adhesivas en diferentes superficies húmedas que presentan estos anuros. Destacándose particularmente el hallazgo realizado con respecto a la morfología del callo nupcial que utiliza la *Lithobates vibicarius* para aferrarse a la hembra durante el amplexo.

1.5. Metodología

La metodología se presenta en etapas para una mejor estructuración de las actividades a realizar para el desarrollo de esta investigación. La división se realiza de esta manera con el fin de trabajar en cada uno de los aspectos relevantes de manera ordenada y continua. En la figura 1.1 se presenta el diagrama de sistematización de la metodología.

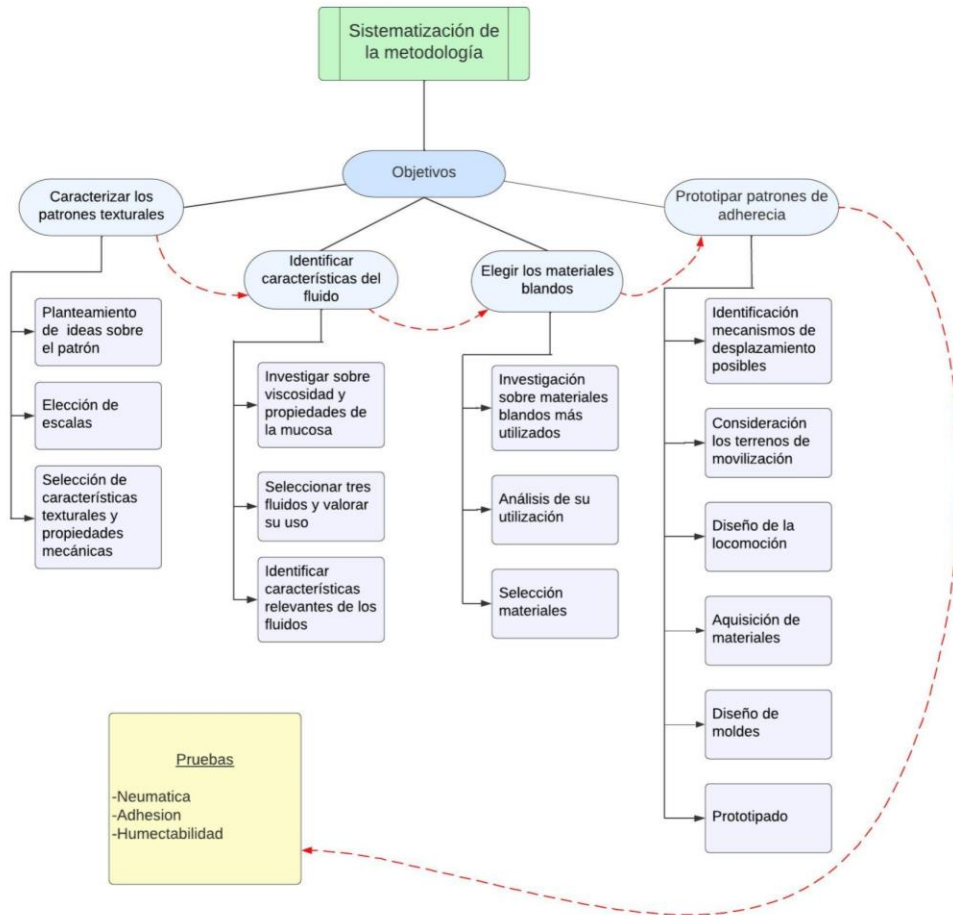


Figura 1.1. Diagrama de la sistematización de la metodología.

1.5.1. Primera Etapa: Caracterización de la Superficie

Consiste en la formulación de ideas, planteamientos y demás caracterizaciones de la superficie a replicar. Las actividades a realizar son las siguientes:

- Plantear ideas sobre el patrón a implementar en la superficie basadas en lo encontrado en la rana de suelo, con el objetivo de maximizar la adherencia.
- Elegir las escalas para replicar las superficies.
- Seleccionar las características texturales y propiedades mecánicas relevantes a considerar, evaluando lo que se tiene tanto en topografía de la superficie como los mapas primarios.

1.5.2. Segunda Etapa: Fluido de Adherencia

Es referente a la investigación y selección del fluido a utilizar para propiciar la adherencia del patrón bioinspirado en varias superficies de diferentes rugosidades, para su realización se organizan las siguientes actividades:

- Investigar sobre la viscosidad y propiedades de la mucosa que segregan las ranas.
- Seleccionar tres fluidos y valorarlos para su uso en el proyecto.
- Identificar las características relevantes de estos fluidos por medio del uso del viscosímetro y el goniómetro.

1.5.3. Tercera Etapa: Locomoción del prototipo

Busca definir la locomoción que tendrá el prototipo de robótica suave, basándose en el análisis de proyectos similares y las condiciones del país. Se tienen las siguientes actividades:

- Identificar los mecanismos de desplazamiento que se han diseñado ya en proyectos similares.
- Considerar los terrenos más probables por los que tendrá que moverse el robot blando.

- Diseñar el movimiento que tendrá el elemento flexible.

1.5.4. Cuarta Etapa: Selección de materiales para prototipado

Consiste en la investigación y selección de materiales de naturaleza blanda a utilizar para el prototipado de la superficie a replicar, según las consideraciones que se deba tomar para el mismo. Se organiza hacer lo siguiente:

- Investigar sobre los materiales blandos más utilizados para prototipar proyectos similares y sus principales características.
- Analizar las posibilidades de utilizarlos para las réplicas a realizar, según disponibilidad en el mercado y otras consideraciones de interés.
- Seleccionar los que mejor se adapten a las necesidades del elemento flexible.

1.5.5. Quinta Etapa: Prototipado

Implica la realización de los moldes para el posterior prototipado de la superficie, con las morfologías y escala seleccionada en los materiales considerados para la creación del elemento flexible. Las actividades a realizar son las siguientes:

- Adquirir los materiales.
- Con base en la caracterización de la superficie y la escala seleccionada, diseñar los moldes para el prototipado del elemento.
- Realizar el prototipo.

1.5.6. Sexta Etapa: Pruebas

Consiste en realizar pruebas de humectabilidad y adherencia, con la superficie prototipada y el fluido seleccionado, para esto se organiza la siguiente actividad:

- Realizar pruebas de neumática, adherencia y humectabilidad con el prototipo elaborado.

1.6. Alcance y limitaciones

El presente trabajo se enfocará en ser la primera etapa para la construcción de un robot suave que ayude en misiones de rescate, por lo que desarrollará una metodología que permita la conformación y adaptación de materiales blandos, dirigida al diseño y construcción de un prototipo.

El equipo, materiales y demás instrumentación para la conformación de esta metodología, el prototipado y su análisis de adherencia, será proporcionado principalmente por el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC), gracias al cual también se tendrá asistencia por parte de su personal capacitado. Adicionalmente, se estará avanzando con la colaboración del Instituto de Investigaciones en Arte (IIArte).

Para beneficiar al personal encargado de atender misiones de rescate y, realmente aportar algo a su labor, se planea incorporar a instituciones especializadas en el área de atención de emergencias, para que brinden su opinión con respecto al diseño. Las entidades con las cuales se busca cooperar son el Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, la Comisión Nacional de Emergencias y/o la Cruz Roja Costarricense.

Entre las limitaciones que se tienen, se destaca el uso no continuo del laboratorio por motivos de la pandemia, lo cual podría ralentizar el desarrollo de alguna etapa del proyecto.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1 *Lithobates vibicarius*

Es una rana (ver Figura 2.1) en peligro de extinción, debido al tamaño de su población y al decrecimiento de esta (IUCN SSC Amphibian Specialist Group, 2020). Según se menciona en la Lista Roja de Especies Amenazadas de UICN (2020), es una rana semi acuática, encontrada en las zonas montañosas bajas y en las porciones bajas de los bosques lluviosos montanos. Se le conoce también como la Rana de Rancho Redondo o como la Rana de Ojos Verdes.



Figura 2.1. *Espécimen de la Lithobates vibicarius adulta. Adaptado de “Amphibian Skin Microbiome and Its Interaction with Batrachochytrium dendrobatidis: Tools to Mitigate Chytridiomycosis in Costa Rica”, por R. Jiménez Quirós. Producido por G. Alvarado, 2016, Amphibians. Copyright 2016 por The Rufford Foundation.*

Previamente este anuro se encontraba en la Cordillera de Tilarán y la Cordillera Central de Costa Rica, y en Panamá, a elevaciones de 1500 a 2700 m.s.n.m. (Savage, 2002). Los últimos registros de esta rana han sido en el Parque Nacional Braulio Carrillo, Parque Nacional Juan Castro Blanco (Jiménez et al. 2019); Bosque Eterno de los Niños, Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes (Morera-Chacón & Sánchez-Porras, 2015; Acosta et al., 2019), Reserva Santa Elena y el Parque Nacional Tapantí (IUCN SSC Amphibian Specialist Group, 2020).

En la siguiente tabla se muestra las categorías taxonómicas de la especie:

Tabla 2.1

Taxonomía de la *Lithobates vibicarius*.

Reino	Filo	Clase	Orden	Familia	Género	Especie
Animalia	Chordata	Anfibio	Anuro	Ranidae	<i>Lithobates</i>	<i>L. vibicarius</i>

Nota. Recuperado de IUCN SSC Amphibian Specialist Group. Copyright 2020 por The IUCN Red List of Threatened Species 2020.

2.1.2 Piel del Anuro

La piel de las ranas tiene una textura rugosa, la cual en la capa de la epidermis presenta espesores variados con “proyecciones o hendiduras” (Flores-Fournier, 2020). Duellman & Trueb (1994) mencionan que Elías y Shapiro (1957) establecen que el sistema tegumentario de las ranas está cubierto de queratina, lo que influye en su textura.

Flores-Fournier (2020) describe que los dedos interiores de las ranas presentan puntas queratinizadas, puntiagudas y con forma de garra. Estas puntas se hallan en zonas donde Xue et al. (2017) caracterizan almohadillas adhesivas conformadas por matrices hexagonales de células epiteliales, las cuales se encuentran separadas por canales estrechos cubiertos por nanofibras de queratina. La queratina se orienta en esta estructura con un ángulo de “entre 60° y 90° con respecto a la superficie de la almohadilla del dedo” (Flores-Fournier, 2020).

Referente a las características mecánicas de estas almohadillas, Barnes et al. (2011) detallan que tienen un módulo de elasticidad de entre 5 y 15 MPa, equivalente al del caucho de silicona. Además, especifican que esta es una de las estructuras biológicas más suaves, con un módulo elástico efectivo de entre 4 y 25 kPa, teniendo también un gradiente de rigidez, con su parte más rígida ubicada afuera, como también referencia Flores-Fournier (2020).

Sobre ese gradiente de rigidez se menciona que ocurre debido a que hay una red densa de capilares que se ubican debajo de la epidermis de estas almohadillas, cuya función se relaciona con la absorción de impactos (Flores-Fournier, 2020).

Relacionado a su espesor, se describe que el mismo oscila entre los 10 y 15 μm (Barnes et al., 2011).

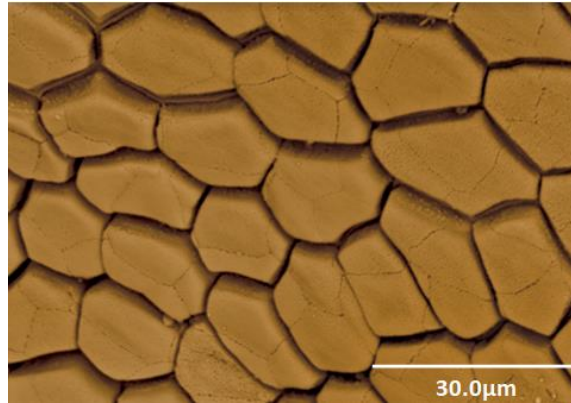


Figura 2.2. Células hexagonales cubiertas por queratina del palmar de la *Lithobates vibicarius* fotografiadas con el microscopio electrónico de barrido. Fuente: Flores-Fourier, 2020.

Resulta importante mencionar que, por los canales que se aprecian en la imagen anterior es por donde circula el fluido segregado por la rana, el cual facilita la adhesión. Dicho fluido es el que está presente también en la adherencia que ocurre con la almohadilla o callo nupcial.

2.1.3 Descripción del Callo Nupcial

Se describe como una “una hinchazón oscura en el dedo interior de la rana macho” según Flores-Fourier (2020), la cual se desarrolla durante la época de reproducción de esta especie, es decir, el amplexo, para ayudar al macho a sujetar a la hembra. La misma autora señala que esta adhesión entre anuros, generada por el uso del callo puede durar desde minutos hasta días.

En el trabajo presentado por la ingeniera Flores-Fourier en el 2020, se detallan y caracterizan las ultraestructuras presentes en la extremidad de la rana. En este documento se muestran las protuberancias presentes en el callo nupcial, las cuales se muestran a continuación:

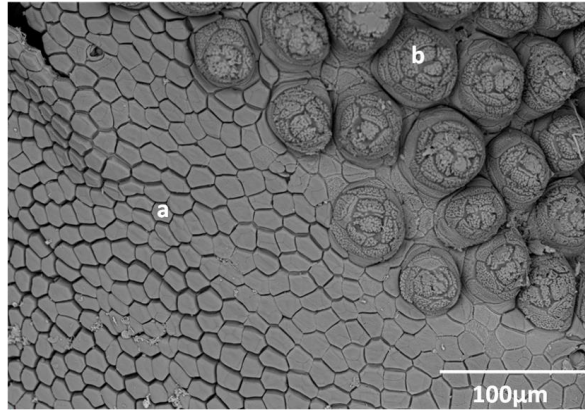


Figura 2.3. Ultraestructura obtenida de una *Lithobates vibicarius*, con presencia de formaciones celulares queratinizadas en formaciones hexagonales, cuyo ángulo preferencial de direccionalidad es de 60 grados en las zonas ventrales y b) una estructura compuesta de protuberancias papiladas, encontradas en el callo nupcial. Fuente: Flores-Fourier, 2020.

Según describe la misma autora, estas protuberancias “están compuestas por un núcleo tipo roseta y bandas queratinizadas”, estas últimas, con espesores que se aproximan a los 12 μm . Flores-Fourier también indica que su “morfología básica responde a la textura superficial basal (hexagonal)”. Estas rosetas o protuberancias papilares dan a la rana una versatilidad de respuesta ante diferentes superficies de contacto, debido a que se fragmentan en bandas formadas por células epiteliales que se adaptan según la necesidad (Flores-Fourier, 2020).

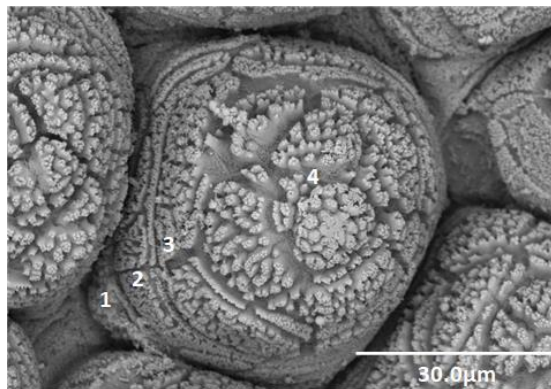


Figura 2.4. Rosetas o protuberancias papiladas presentes en el callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*. Fuente: Flores-Fourier, 2020.

Centrándose más específicamente en la caracterización de la estructura, el mismo documento especifica que hay tres bandas que se destacan en las papilas de mayor tamaño, las cuales se componen de filamentos queratinizados en formación que se distribuyen concéntricamente y con diámetros promedio de 0,3 μm en los extremos. También se menciona que el diámetro de la base de la roseta es de 30 μm y que el

mismo no depende de la ubicación. Aunque, por otro lado, su longitud si aumenta dependiendo de qué tan alejado de la frontera estructural está, “llegando a medir en promedio hasta 45 μm ” (Flores-Fourier, 2020).

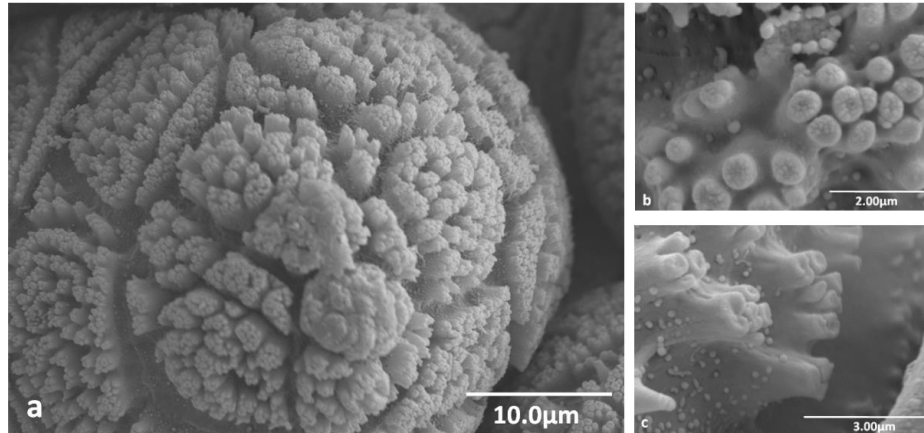


Figura 2.5. *Protuberancia papilada*. a) Vista de roseta central de la protuberancia. b) Vista frontal de filamentos. c) Vista lateral de filamentos. Fuente: Flores-Fourier, 2020.

A un acercamiento mayor, las células epiteliales que componen la roseta, las cuales están cubiertas por queratina, presentan variaciones en sus dimensiones de espesor y de profundidad partiendo desde la superficie basal de la protuberancia papilada. Flores-Fourier (2020) asocia la variación en el espesor con las capacidades de adherencia y de respuesta ante superficies húmedas, influyendo directamente en la funcionalidad de ambas.

Parte del trabajo desarrollado por la autora Flores-Fourier incluye también la definición del mapa textural básico de esta estructura, para ello obtuvo el ángulo preferencial de la ultraestructura mediante la agrupación de protuberancias centrales, las cuales conectó entre sí para medir el ángulo. Este ángulo resultó ser de 60° y se muestra a continuación:

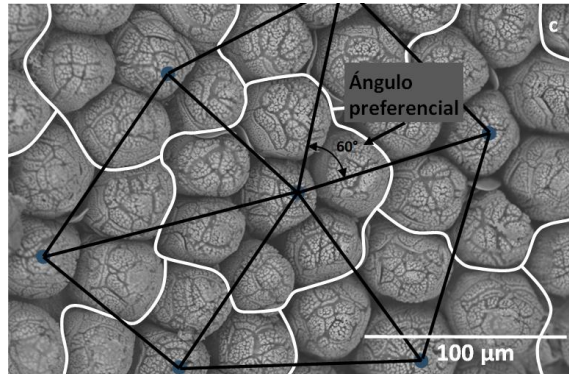


Figura 2.6. Ángulo preferencial del mapa textural básico del callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*. Fuente: Flores-Fourier, 2020.

2.1.4 Glándulas Mucosas

Las ranas tienen unas glándulas por las cuales se secreta la mucosa que utilizan para mantenerse hidratadas y evitar la desecación (Moro, 2015). Toledo y Jared (1995), detallan más su labor al describir cómo intervienen también en las funciones de respiración cutánea, termorregulación, reproducción y, en ciertos casos, en su defensa. En la adhesión, el líquido secretado por estas glándulas es necesario para la succión que propicia la adhesividad húmeda, siendo distribuido a través de los canales que se encuentran en las células epidérmicas.

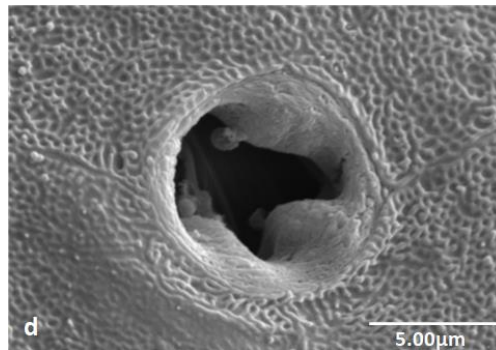


Figura 2.7. Glándula mucosa en meseta de tejido imbricado. Fuente: Flores-Fourier, 2020.

Según detalla Flores-Fourier (2020), las glándulas mucosas de la *Lithobates vibicarius* tienen diámetros promedio de 7.5 μm , mencionando también que las mismas se alojan en tejidos imbricados similares a mesetas, los cuales se ubican en los puntos triples o cerca de ellos.

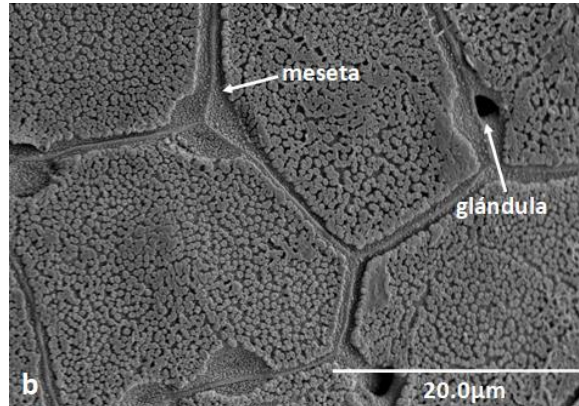


Figura 2.8. Vista de las glándulas en células epiteliales. Fuente: Flores-Fourier, 2020.

2.2 Adhesión de los Anuros

Los anuros se destacan por su único sistema de adhesión, el cual les permite colgarse de un gran rango de superficies. En el documento de Flores-Fourier (2020), se menciona que uno de los mecanismos de adhesión principales en superficies lisas es “la succión creada por la colocación cuidadosa de las patas, cuyos perímetros suaves se adhieren al sustrato mientras que la parte media se levanta”. Adicionalmente, que esa succión necesita de la humedad, la cual en el caso de estos anfibios es segregada por las glándulas mucosas en la dermis palmar y plantar.

Smith et al. (2006), establecen la relación que tienen la morfología, la superficie de contacto y la viscosidad del fluido mucoso segregado, en la adhesión húmeda de las ranas, misma que se caracteriza por ser reversible (Meng et al., 2019), o descrita de manera más funcional, un mecanismo de adhesión reutilizable. Esta capacidad de adherencia mayormente trabaja con fuerzas hidrodinámicas, que provocan que el líquido suba o baje en los conductos (Endlein & Barnes, 2015). Estas fuerzas hidrodinámicas dependen de la capilaridad, la cual se cree es la fuerza dominante, y, de la viscosidad (Nachtigall, 1974).

Se debe mencionar que también influyen las fuerzas de Van der Waals (Langowski et al., 2018). Al respecto, Endlein & Barnes (2015) describen que, siendo el espesor de la capa del fluido presente en la almohadilla de la rana menor a 35 nm en algunas áreas de la zona de contacto, es probable que haya un contacto directo a nivel nanoestructural entre la almohadilla y el sustrato. Lo anterior corresponde a las fuerzas de Van der Waals involucradas, aunque se desconoce hasta qué punto.

Técnicas de microreometría y microscopía de reflexión de interferencia han sido utilizadas para estudiar las propiedades del moco presente en los dedos de los anuros. Aproximadamente, se obtuvo que la viscosidad del fluido es de 1.43 mPa·s, lo cual equivale a 1.4 veces la viscosidad del agua (Endlein & Barnes, 2015). Estudios han señalado que, aunque no se han encontrado propiedades no-newtonianas en la mucosidad, hay posibilidad de que se presenten en mucosa más concentrada.

Las ranas arborícolas poseen almohadillas en sus dedos que tienen la capacidad de generar fricción, las fuerzas máximas de fricción en ocasiones sobrepasan las fuerzas originadas de la adhesión (Endlein et al., 2017). Meng y colaboradores (2019), resaltan el potencial en aplicaciones médicas que tiene la adherencia de los anuros, debido a la buena adhesión y fricción que crean con sus almohadillas en superficies suaves húmedas.

Se han realizado mediciones cuantitativas de las fuerzas de adhesión y fricción de las ranas arborícolas. Según los resultados obtenidos por Smith et al. (2006), la fuerza de adhesión por unidad de área de estas ranas se encuentra en el rango de 0.3 a 2.0 mNmm⁻² (0.3 a 2.0 kPa). Con respecto al mecanismo de separación que se lleva a cabo en las almohadillas de los anuros, el mismo es de descamación o peladura (peeling), lo cual le permite al animal saltar o dar pasos sin tener que sacar sus patas del sustrato (Endlein & Barnes, 2015).

Además de utilizarse para su movilidad y sobrevivencia, las capacidades de adherencia de estos organismos son empleadas durante la época de reproducción. En el amplexo, modo de apareamiento de los anuros, el macho se adhiere a la hembra sujetándola con sus extremidades (Sung et al., 2021) durante minutos o incluso varias horas, como es el caso documentado por Flores-Hernández & Martínez-Coronel (2014), el cuál continuó por más de 39 horas, sin haberse interrumpido a pesar de ser manipulado por los investigadores, evidenciando el potencial adhesivo de estos anfibios.



Figura 2.9. *Lithobates vibicarius* adheridas durante el amplexo. Fuente: Wainwright & Gray, 2009.

2.3 Superficies Bioinspiradas

Meng et al. (2019) mencionan el valor de la evolución en la selección natural y el cómo la misma ha creado estructuras en animales y plantas sumamente adaptadas a sus funciones, las cuales han servido de inspiración para resolver problemas complejos de los seres humanos. Relacionado con superficies y texturas, los mismos autores ejemplifican lo anterior con los trajes de baño diseñados para reducir la fuerza de arrastre y mejorar la eficiencia durante el nado, inspirados en el patrón de los dentículos dérmicos que cubren la piel de tiburones capaces de nadar velozmente.

También los mismos autores mencionan una pintura para exteriores, Lotusan, con características superhidrofóbicas que propician un efecto de auto limpieza. Es así como se tienen diversos proyectos en los cuales se desarrollaron superficies bioinspiradas como referencia para la fabricación de biotexturas, en este caso destacándose los que se describen en las siguientes secciones.

2.3.2 Gecko

La fabricación de superficies bioinspiradas se basa en características que van desde la escala nano hasta la macro (Sun & Bhushan, 2019). Dos estructuras encontradas en la pata del gecko, setae a escala micro y spatulae a escala nano, por ejemplo,

han demostrado aportar grandes capacidades adhesivas y superhidrofóbicas a la superficie (Autumn, Liang, Hsieh, Zesch, Chan, Kenny, Fearing & Full, 2000).

El estudio de estas estructuras ha sido relevante y más desarrollado debido a que el gecko es el animal de mayor peso que presenta adhesión reversible para su movimiento, además de tener una habilidad sorprendente para desenvolverse en los techos (Meng et al., 2019). Meng y colaboradores (2019), detallan que dicha adhesión se da principalmente por fuerzas de van der Waals, que surgen del contacto sumamente cercano que logran las puntas spatulae derivadas de las ramificaciones setae.

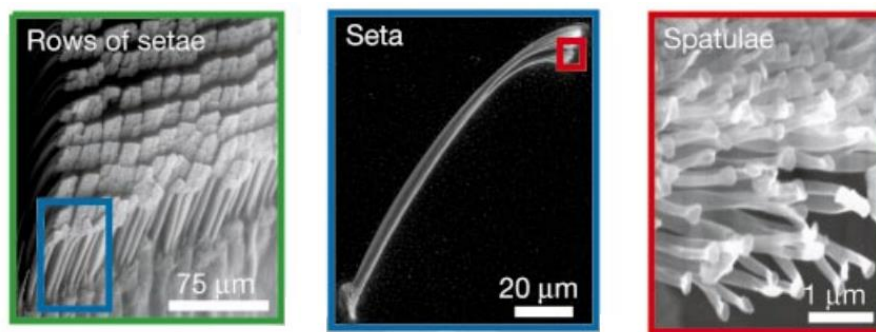


Figura 2.10. Micrografías de la morfología presente en el dedo de un gecko, en específico las filas de setae, un seta presentado individualmente y varios spatulae. Fuente: Autumn et al., 2000.

Se han creado diversos proyectos inspirados en el gecko, los cuales han resultado en el desarrollo de adhesivos que han llegado a soportar el peso de una persona, sin embargo, estas estructuras bioinspiradas han sido difíciles de imitar y su durabilidad no ha sido la deseada (Meng et al., 2019). Contrastando con el caso de diseñar con base en los anuros, debido a su naturaleza de adhesión húmeda, como también hacen énfasis los autores Meng et al. (2019), se espera que el desarrollo biomimético difiera del que se obtuvo con los geckos.

2.3.3 Anuros

La estructura celular hallada en las almohadillas de las patas de las ranas de árbol se replicó en el grupo de investigación del Instituto para investigación de Polímeros Max Planck (Max Planck Institute for Polymer Research) en Maguncia, Alemania. Ellos mimetizaron la estructura de los epitelios, replicando las nano y microestructuras (Endlein & Barnes, 2015).

En el año 2017, Xue et al., replicaron las estructuras encontradas en las almohadillas adhesivas de las ranas arborícolas, con el fin de replicar las características direccionales que las mismas presentan. En su documento describen un método de fabricación de micropatrones de superficie compuestos por una matriz elastomérica suave y nanopilares poliméricos colocados paralelamente con interacciones interfaciales sintonizables (Xue et al., 2017). Según mencionan también, sus patrones imitan los patrones geométricos y las propiedades mecánicas del epitelio queratinizado de estos anuros y, el método utilizado de fabricación es genérico y adaptable a otros diseños de superficies con otras combinaciones de materiales.

Con respecto a las dimensiones de las texturas replicadas, las matrices hexagonales tienen nanopilares cilíndricos con períodos de 500 nm, el diámetro de las varillas es de 330 nm y su altura fue de 10 μm (Xue et al., 2017). Estas estructuras se obtuvieron mediante la replicación de membranas de óxido de aluminio anódico (AAO). Los canales hexagonales tuvieron una profundidad de 5 μm y 3 μm de ancho.

2.4 Robótica Suave

Surgiendo desde la primera mitad del siglo 20, la robótica suave pretende crear máquinas totalmente autónomas que tengan la capacidad de moverse de manera independiente, interactuando y adaptando sus operaciones físicas a ambientes con condiciones cambiantes (Majidi, 2018). Los materiales biológicos y el observar el comportamiento de diferentes organismos, han sido fuente de inspiración para diversos diseñadores que han incorporado tecnología blanda en sus diseños (Kim et al., 2013). Relacionado a lo anterior, según señala Majidi (2018), desde la década de 1940 se han hecho esfuerzos para crear actuadores y electrónicos hechos de elastómeros, textiles y otros materiales suaves, para asemejar la flexibilidad y deformación de tejidos biológicos.

La robótica suave revoluciona la robótica, pasando de emplear piezas y componentes mayormente rígidos a utilizar materiales más similares a los que presenta la naturaleza. Este nuevo campo es considerado por los investigadores como lo que simplificará el diseño actual de robots con mecánicas más complejas, acelerando también el camino de robots capaces de interactuar con los humanos de manera segura (Kim et al., 2013). Su implementación tecnológica ha llevado a grandes avances en áreas de automatización industrial, robots quirúrgicos y vehículos autónomos (Majidi, 2018).

2.4.2 Locomoción en Robótica Suave

El uso tan eficiente que le dan los animales a sus estructuras suaves no ha pasado desapercibido. Diversos ingenieros y diseñadores se han inspirado en sus capacidades en ambientes complejos, aprovechándolas como fuente de inspiración en sus diseños de robótica suave (Kim et al., 2013).

Bern et al. (2019), realizaron un estudio para la optimización de la trayectoria de un robot blando articulado por cables. El dispositivo fue moldeado en espuma flexible y los cables utilizados eran de hilo para pescar. Los investigadores rescatan la importancia de entender como explotar lo materiales suaves efectivamente para recrear la compleja gama de habilidades motoras que se muestran en la naturaleza.

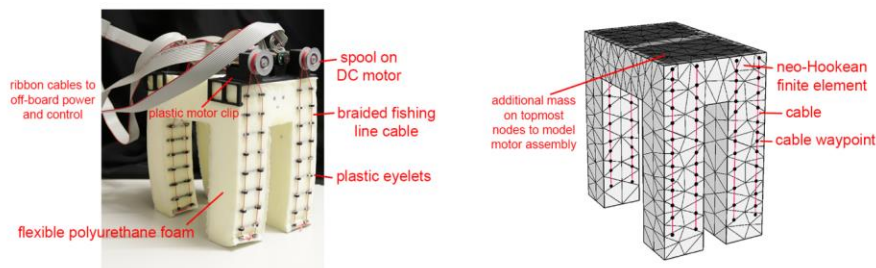


Figura 2.11. Robot “Cachorro”, proyecto de robótica suave cuya locomoción sucede a través de cables. Fuente: Bern et al., 2019.

El equipo de Shepherd et al. (2011), elaboró un robot completamente blando utilizando polímeros elastoméricos, inspirado en calamares, estrellas de mar y gusanos, los cuales comparten la carencia de esqueletos duros internos. Se menciona que para este proyecto se utilizó litografía suave para crear un robot accionado neumáticamente con una capacidad de locomoción sofisticada.

En concreto, el robot multipaso creado por Shepherd y colaboradores (2011), trabaja con cinco actuadores y un sistema neumático que opera a presiones menores a los 10 psi. El documento menciona cuatro razones principales por las que utilizaron este sistema: 1. El aire comprimido es fácil de generar; 2. Amigable con el medio ambiente; 3. ligero; 4. Es no viscoso por lo que permite un movimiento rápido.

El diseño de canales por los cuales fluye el aire se basa en la arquitectura pneu-net (PN). Conocidos como del tipo McKibben, el modelo se basa en estos actuadores de naturaleza suave de accionamiento neumático (Pneumatically-driven McKibben-type actuators), los cuales llevan existiendo más sesenta años (Ilievski et al., 2011).

En específico se tiene la descripción dada por Ilievski y colaboradores (2011), en la cual explican que estos actuadores “consisten en una vejiga cubierta por un caparazón de fibras trenzadas, fuertes e inextensibles”. Entre sus variantes se les conoce también por el término de Músculo McKibben de aire (McKibben Air Muscle).

En este caso, el actuador moldeado consiste en cámaras (o canales) incrustadas en una capa de elastómero que se extiende, unidas a una segunda capa que es inextensible, dichas cámaras se inflan para crear el movimiento. Este trabajo evidencia la posibilidad de crear robots suaves de simple diseño y control, con buena movilidad.

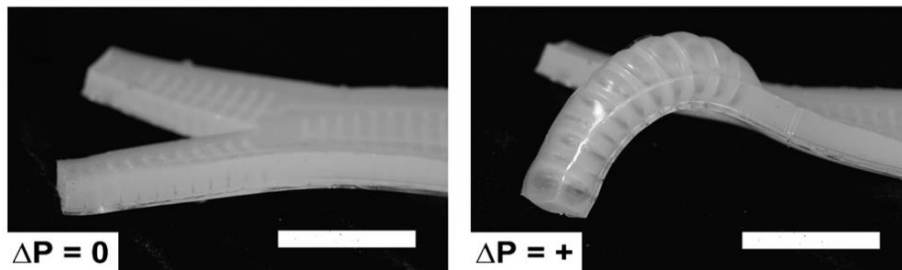


Figura 2.12. Robot multipaso de accionamiento neumático basado en los actuadores McKibben. Fuente: Shepherd et al., 2011.

2.4.3 Materiales Blandos para el Prototipado

Los tejidos blandos son parte fundamental de los diseños biomecánicos, definiendo el “desempeño, eficiencia y robustez de los movimientos que se observan en el reino animal” (Bern et al., 2019). Según Shepherd y colaboradores (2011), muchas de las capacidades de los robots suaves se definirán por los materiales utilizados en su fabricación, siendo el uso de materiales blandos el camino simple para la elaboración de las estructuras mecánicas complejas vistas en los robots rígidos. En su mayoría, los sistemas de robótica suave desarrollados se componen de polímeros suaves, elastómeros como el caucho de silicona y, algunos contienen fluidos. Los elastómeros son típicamente utilizados para las extremidades o dedos, cubierta y para colocar allí los circuitos eléctricos (Majidi, 2018).

Específicamente, a lo que se refiere a materiales utilizados en la fabricación de texturas inspiradas en anuros, se tiene el trabajo de Xue et al. (2017) quienes realizaron matrices de micropatrones basándose en ranas arborícolas. Los patrones estaban compuestos por micropilotes de polidimetilsiloxano (PDMS) (Módulo de Young $E \sim 2$ MPa), un polímero orgánico basado en silicio, incrustados con nanopilares de poliestireno (PS) ($E \sim 3$ GPa).

Las ventosas del pulpo, “capaces de adherirse a superficies no porosas y generando una fuerza de unión muy fuerte” (Tramacere et al., 2015), deben esta funcionalidad a la suavidad de sus tejidos y a la morfología que presentan. En el proyecto bioinspirado de Tramacere et al. (2015), para asemejar la naturaleza blanda de esta estructura se recurrió al uso de materiales elastoméricos suaves como lo son el Ecoflex 00-30, Ecoflex 00-50 y el Dragon Skin 10. Según los mismos autores describen, estas siliconas se consiguen a partir de una mezcla de dos líquidos desgasificados durante cinco minutos en un horno de vacío.

El proyecto de Shepherd et al. (2011), utilizó los mismos cauchos de silicona de la marca Ecoflex mencionados en el prototipo anterior para la capa del actuador, debido a su alta capacidad de extenderse a bajos esfuerzos. También emplearon polidimetilsiloxano (PDMS), específicamente el producto Sylgard 184, para la capa que limita la deformación, es decir, la capa más rígida que se considera relativamente inextensible.

2.5 Nanomanufactura

Sun y Bhushan (2019) describen el cómo estructuras biomiméticas aportan en resolver problemáticas de energía, recursos, medio ambiente y salud humana y, que para el desarrollo de estos materiales, con estructuras espaciales similares a las encontradas en los organismos, las técnicas de nanomanufactura son de gran utilidad. La nanomanufactura es utilizada para crear nanoestructuras en 1, 2 y 3 dimensiones, en rangos que van desde 1 nm hasta 100 nm (Bhushan, 2017).

Dependiendo del tamaño de las características y del material, los procesos necesarios pueden ser sustractivos o aditivos, los cuales se denominan también “de arriba hacia abajo” y “de abajo hacia arriba” respectivamente (Madou, 2011). Los procesos sustractivos incluyen litografía suave, litografía, grabado con plasma, separación de fases y arrugamiento de la superficie (Sun & Bhushan, 2019). Por otro lado, los procesos aditivos se refieren al auto ensamblaje, deposición química, método sol-gel, electrohilado y nanolitografía por inmersión (Sun & Bhushan, 2019). Ambos tipos de procesos pueden utilizarse en conjunto (Bhushan, 2017).

2.5.2 Litografía Suave

La litografía suave, conocida también en inglés como templating o soft lithography, es un proceso donde se crean plantillas (templates) o moldes y a partir de ellos se moldean réplicas. Sun & Bhushan (2019) comentan que la estructura y la topografía de la réplica generada están limitadas por la idoneidad de la plantilla y el material utilizado. Según los mismos autores, se han obtenido resoluciones de menos de 20 nm, por lo que la técnica se emplea para crear estructuras a escalas micro y nano.

El uso de plantillas para replicar estructuras ha sido frecuentemente utilizado para producir diversas morfologías e imitar patrones encontrados en la naturaleza de manera más precisa que otros métodos (Bhushan, 2017). Sin embargo, este proceso aún tiene grandes desafíos, como lo son mejorar su precisión, durabilidad y la creación de plantillas que se separen fácilmente, refiriéndose en particular a las plantillas utilizadas para replicar estructuras jerárquicas micro/nano irregulares (Sun & Bhushan, 2019). En general, la litografía suave implica el uso de múltiples pasos de moldeo, los cuales dependen de las estructuras deseadas a producir.

Xia & Whitesides (1998) mencionan las siguientes técnicas de litografía suave: impresión por microcontacto (μ CP), moldeo de réplicas (REM), moldeo por microtransferencia (μ TM), micromoldeo en capilares (MIMIC), y micromoldeo asistido por solvente (SAMIM). Estos procesos se catalogan así debido a que en todos el patrón se transfiere al sustrato por medio de un sello o molde elastomérico (Xia & Whitesides, 1998).

Es importante mencionar que el fuerte de la litografía suave radica en replicar las estructuras más que en crear el molde, para lo anterior el prototipado rápido y la capacidad de deformar plantillas y moldes elastoméricos resultan clave (Xia & Whitesides, 1998). Otras de las grandes ventajas que ofrece este proceso es su bajo costo y simpleza.

2.6 Sensibilidad Artística en el Diseño

Similar al trabajo realizado por Sareh et al. (2017), en el cual un equipo multidisciplinario, que incluía al líder académico en robótica del Royal College of Art, construyó una ventosa robótica inspirada en el pulpo, el actual proyecto incluye también la experiencia y conocimientos de un artista. El desarrollo de este prototipo incorpora parte de las técnicas del licenciado Jonathan Torres Rodríguez, quien lleva años desarrollándose en la escultura bioinspirada.

Descrita por el artista como un bio-modelaje digital, su principal técnica consiste en traspasar información natural a un proceso digital, innovando con su protocolo de aplicación. Se utiliza un mapa de grises para generar un modelo tridimensional, proceso usualmente empleado en la parte artística del modelado digital, aunque en este caso, tomando referencias de la naturaleza (imágenes de microscopía electrónica), para replicar texturas e implementarlas en fines más prácticos, desde la perspectiva artística.

La conformación de este proceso se basa en técnicas de modelado digital, modelado escultórico y, el arte de los efectos especiales, áreas que Torres investigó, practicó e interrelacionó por varios años, para obtener modelos digitales fieles a las texturas biológicas. Estos modelos de las biotexturas se trabajan con técnicas de fabricación como lo es el moldeo o la impresión 3D.

Resulta necesario mencionar también, la formación en cuanto a texturas, biología y materiales que ha tenido el artista durante este proceso de constitución de la técnica, la cual le ha dado coherencia a su proceso de generación. Sumado a esto, parte del desarrollo se debe a su experiencia adquirida trabajando con materiales en talleres desde los 7 años. Por lo anterior, es posible describir este proceso como nacido del interés, la curiosidad y la propia habilidad del escultor, formalizado por un estudio en conjunto de distintas disciplinas desde el año 2012.

Principalmente, el proceso de bio-modelaje se lleva a cabo en tres etapas. Primero, se debe obtener una fotografía plana de la superficie a replicar, si se trata de micro o nano estructuras, entonces una imagen de microscopía electrónica. En específico, Torres mencionó que por plana se refiere a que el lente debe estar perpendicular a la textura, ya que se necesita que la misma tenga mucha información de luz, para poder identificar bien las distintas profundidades.

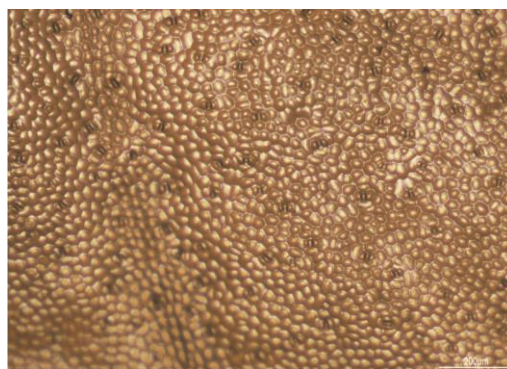


Figura 2.13. *Biotextura de dioscorea alata fotografiada con el microscopio electrónico de barrido. Tomada por Andrea Bogantes Retana, estudiante del curso Biomimética de la Universidad de Costa Rica.*

Estas diferencias de luz se identifican por medio del uso de software para la edición de fotografías, jugando con el contraste para diferenciar lo mejor posible los tonos,

proceso realizado de manera artesanal. Después, se toma una muestra o segmento de la fotografía, el cual pueda ser replicable, y se trabaja en un programa para escultura digital, en donde se toma la información digital y se extruye la textura según el diseño buscado.

Una vez se tiene el modelo, el tercer paso consiste en guardarlo como un archivo para fabricación digital y utilizar algunas de las tecnologías de réplica. Generalmente, se crea un molde con la textura en 3D con el cual se genera el modelo en silicona.

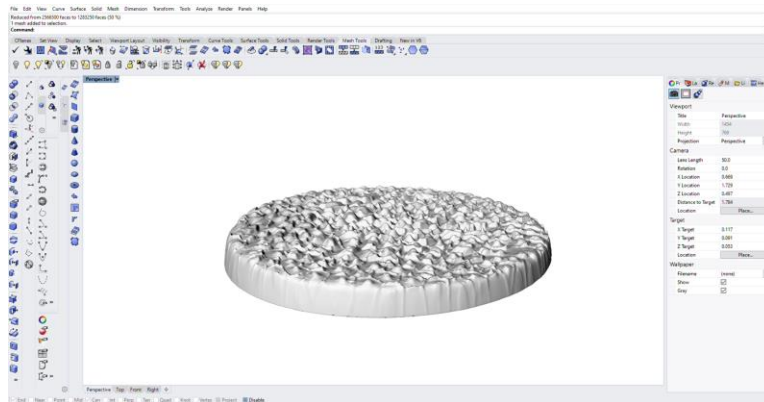


Figura 2.14. Producto del biomodelaje digital de la biotextura de la dioscorea alata trabajada con el programa Rhinoceros 3D. Cortesía de Jonathan Torres Rodríguez, artista escultor egresado de la Universidad de Costa Rica.

Capítulo 3

3. Resultados y Análisis

3.1 Caracterización de las superficies y diseño del patrón

El prototipado requiere del diseño de un patrón replicable, por lo que se parte del análisis de las estructuras más pequeñas a las más grandes para su realización y ordenamiento. Las superficies en las cuales se inspira esta investigación fueron documentadas a profundidad en la tesis de la ingeniera Flores-Fournier del año 2020, titulada *Diseño sistematizado y construcción de herramental y mapas primarios de la microtextura palmar de la *Lithobates vibicarius* y la *Agalychnis spurrelli**. En el caso de este proyecto, la atención se centra en las ultraestructuras presentes en el palmar de la *Lithobates vibicarius*, las cuales se caracterizan principalmente por propiciar las altas capacidades adhesivas.

En los dedos del anuro están las almohadillas adhesivas (ver figura 2.2), las cuales se conforman por matrices hexagonales de las células epiteliales (Xue et al., 2017). Referente a estas almohadillas, Barnes et al. (2011) mencionan que su módulo de elasticidad es de entre 5 y 15 MPa, equivalente al del caucho de silicona y, su módulo elástico efectivo va de 4 a 25 kPa, teniendo un gradiente de rigidez, con su parte más rígida ubicada afuera (Flores-Fournier, 2020). Barnes describe también que el espesor de las mismas oscila entre 10 y 15 μm .

Alrededor de las almohadillas circula la mucosa con la cual se genera la succión con la que los anuros se adhieren al sustrato. Las glándulas mucosas (ver figura 2.7) son las encargadas de expulsar el fluido para que el mismo se distribuya por medio de los canales de las células epidérmicas. En promedio el diámetro de estas ultraestructuras es de 7,5 μm (Flores-Fournier, 2020).

El callo nupcial (ver figura 2.3) se ubica en el dedo interior de las ranas macho y se desarrolla durante la época de reproducción para sujetar a la hembra. La capacidad adhesiva de esta ultraestructura puede durar desde minutos hasta días.

Este callo está conformado por las protuberancias papiladas, llamadas también rosetas (ver figura 2.4). Flores-Fournier (2020) caracterizó los diámetros base de las rosetas, siendo de 30 μm , sin depender de la ubicación, y su longitud, la cual en promedio es de 45 μm , aumentando, dependiendo de cuánto se aleja de la frontera estructural. También, a mayor aumento, la ingeniera muestra la presencia de los filamentos queratinizados que componen las papilas (ver figura 2.5).

El diseño de la superficie a replicar considera a los filamentos queratinizados como la ultraestructura clave del poder de adhesión que tiene el callo nupcial, destacándose la forma de ventosa que presentan. Debido a esto, el diseño del patrón parte de la conformación de un filamento con las dimensiones promedio obtenidas del análisis de las fotografías tomadas en el microscopio electrónico de barrido durante el estudio del palmar de la rana *Lithobates vibicarius* por la Dra. Hennia Cavallini Solano.

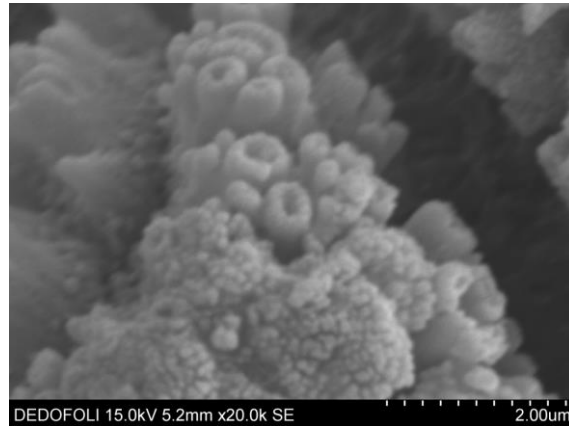


Figura 3.1. Vista superior de los filamentos queratinizados presentes en las protuberancias papiladas del callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*, por la Dra. Hennia Cavallini Solano, 2019.

Es posible observar que los filamentos, a nivel superior, presentan una forma mayormente elíptica con un hundimiento justo en el centro. Derivado de la figura 3.1, se determina que en promedio el radio mayor ronda los $0.7 \mu\text{m}$ y el radio menor los $0.6 \mu\text{m}$, con paredes de $0.2 \mu\text{m}$ que rodean el hueco interior. Con respecto a la altura, de la figura 3.2, se tiene que la misma promedia los $0.3 \mu\text{m}$, distancia hasta la cual se observó que también llega el agujero y, hay una separación entre filamentos de al menos $0.4 \mu\text{m}$.

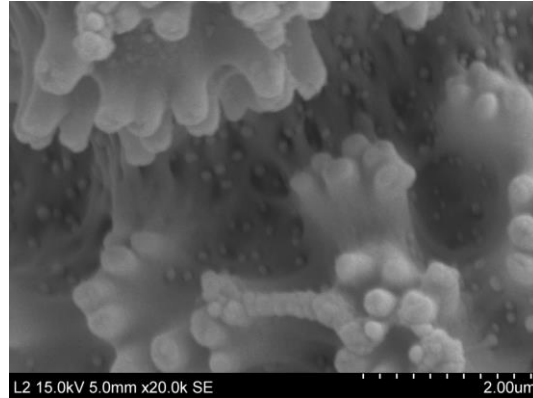


Figura 3.2. Vista del perfil de los filamentos queratinizados presentes en las protuberancias papiladas del callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*, por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.

Según el análisis anterior, se realiza el boceto del filamento queratinizado, definiendo sus parámetros y características principales, para posteriormente realizar el diseño tridimensional del elemento.

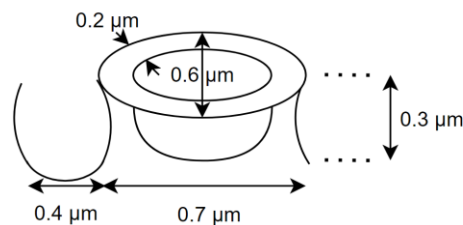


Figura 3.3. Boceto del filamento queratinizado con las dimensiones promedio originales. Elaboración propia en el sitio web diagrams.net, 2022.

Inicialmente, la estructura se conceptualiza modelada en el programa SolidWorks, configurando el documento para que el sistema de unidades sea de micrómetros, ya que según se investigó, la magnitud mínima que es posible trabajar en el software es de 101 nm (0.101 μm) (Jensen, 2013), lo cual en teoría permite trabajar en las dimensiones reales. En la misma referencia, se menciona también que diseñar en el límite inferior puede afectar el correcto funcionamiento y procesamiento de ciertas operaciones del programa.

Se realizan diseños del modelo a escala real, ampliado al doble, al triple y treinta veces mayor. Se presentan inconvenientes en las funciones del software con las cuatro escalas seleccionadas, específicamente, la incapacidad de utilizar algunas funciones, largos tiempos de procesamiento y, archivos resultantes muy pesados.

Al considerar lo anterior y concluir que lo más importante en esta etapa es preservar las relaciones de magnitud presentes en la morfología, se decide realizar el modelado con las magnitudes definidas del análisis de las ultraestructuras originales, pero como si fueran milímetros. Entonces la escala del diseño base es de un aumento de 1000 con respecto a las medidas presentes en el anuro. La

resolución de las impresoras 3D y las necesidades de la aplicación final del prototipo también fueron consideradas como otras de las razones por las que era adecuado modelar a esta escala.

Según lo anterior, el filamento se crea tridimensionalmente con las magnitudes del boceto en escala milimétrica. De manera general, se dibuja como un cilindro elíptico, con una abertura de elipse concéntrica.

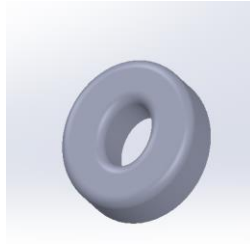


Figura 3.4. *Modelado tridimensional del filamento queratinizado. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.*

Al observar la figura 3.5, se aprecia que los filamentos se presentan en conglomerados con largos promedio desde la base de $1.5 \mu\text{m}$ y diámetros promedio de igual magnitud. El número de filamentos en cada conglomerado varía.

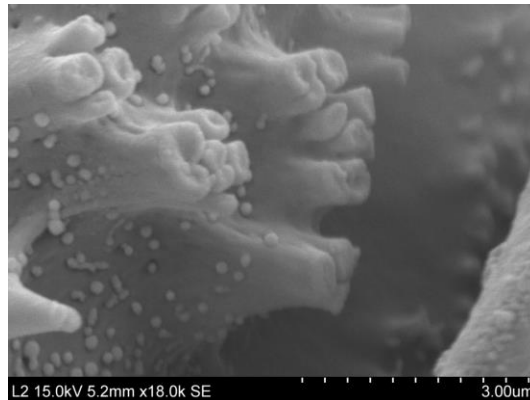


Figura 3.5. *Conglomerados de filamentos queratinizados presentes en el palmar de la Lithobates vibicarius, por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.*

Se decide incorporar al patrón conglomerados de tres, cuatro y cinco filamentos, manteniendo el diámetro y altura mencionados anteriormente. Se realiza el boceto mostrado en la figura 3.6 para ilustrar la posición de los filamentos según la cantidad presente. Los radios mayor y menor de la parte superior de la agrupación varían según el número de filamentos.

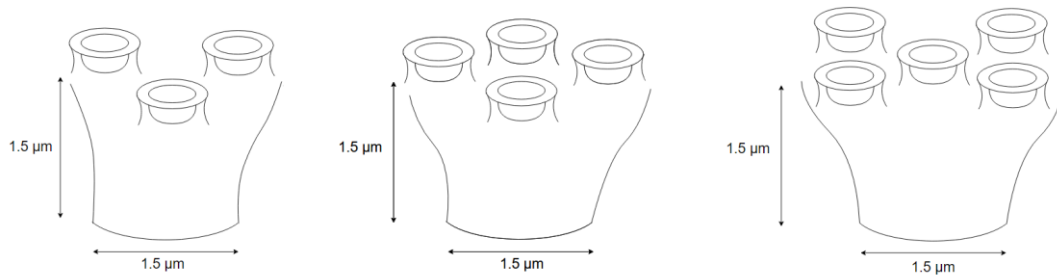


Figura 3.6. Bocetos de los conglomerados de filamentos a utilizar en el diseño del patrón de la biotextura. Elaboración propia en el sitio web diagrams.net, 2022.

Al modelar los conglomerados se obtienen las estructuras mostradas en la figura 3.7. El diseño se hace de manera simple manteniendo los aspectos más característicos de la biotextura, como lo son la proporción altura-diámetro base, la distancia mínima de separación y, los filamentos previamente dibujados.

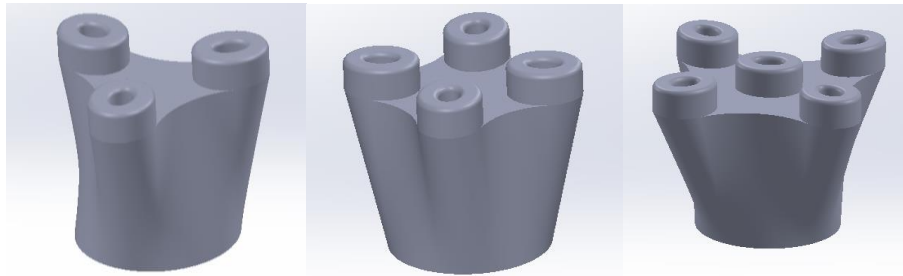


Figura 3.7. Modelos de los conglomerados de filamentos. Elaboración propia con el programa *SolidWorks*, 2022.

Para la conformación del patrón se utilizan como referencia las células hexagonales cubiertas por queratina que están presentes en el palmar del anuro. Flores-Fournier (2020) menciona que esta estructura imita la formación *honeycomb*, llamada así por su similitud con los panales de abeja, la cual beneficia en la absorción de energía y aumenta la rigidez. Dicha forma es observable en el callo nupcial, aunque menos definida. Según se muestra en la figura 3.8, estas células tienen diagonales con valores variados que van de $11.1 \mu\text{m}$ hasta los $17.9 \mu\text{m}$.

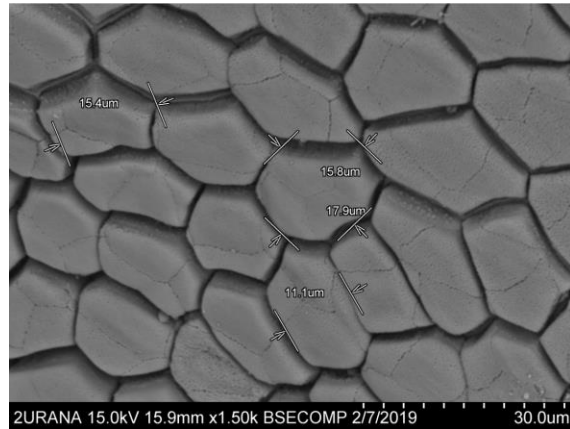


Figura 3.8. Células hexagonales cubiertas por queratina del palmar de la *Lithobates vibicarius*, por la Dra. Hennie Cavallini Solano, 2019.

Anteriormente se ha descrito que los canales alrededor de las células hexagonales son el sitio por donde fluye la mucosa. Basado en los espesores que estos canales presentan, mostrados en la figura 3.9, se selecciona que el distanciamiento mínimo entre los conglomerados sea de $1.5 \mu\text{m}$.

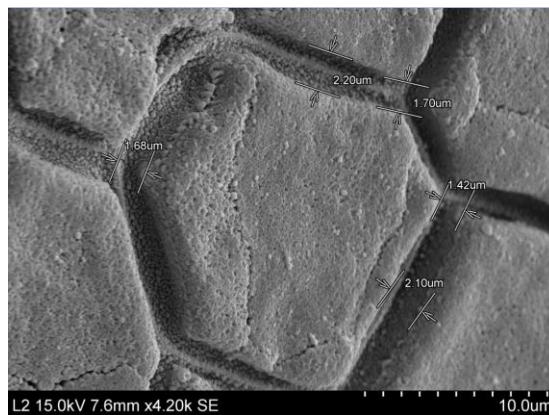


Figura 3.9. Espesores de los canales que rodean las células hexagonales, por la Dra. Hennie Cavallini Solano, 2019.

En la figura 3.10, se dibuja el diseño hexagonal en el cual se incorporan los conglomerados de filamentos queratinizados con una distribución al azar, tal y como sucede en la naturaleza. Se toma la separación entre conglomerados mencionada anteriormente y una diagonal de hexágono de $16 \mu\text{m}$.

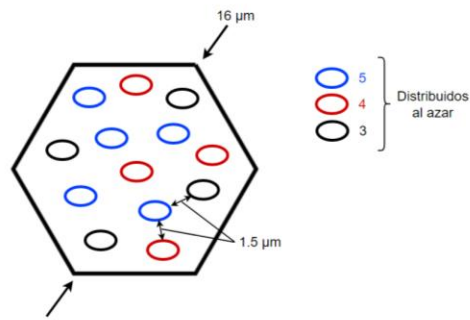


Figura 3.10. Boceto de la distribución de los conglomerados de los filamentos queratinizados en el panel hexagonal. Elaboración propia en el sitio web diagrams.net, 2022.

Para definir el espesor de la base hexagonal, se toma de referencia la figura 3.11, en la cual es posible ver la altura de las células hexagonales. Se define entonces la base hexagonal del patrón con un grosor original de 5 µm.

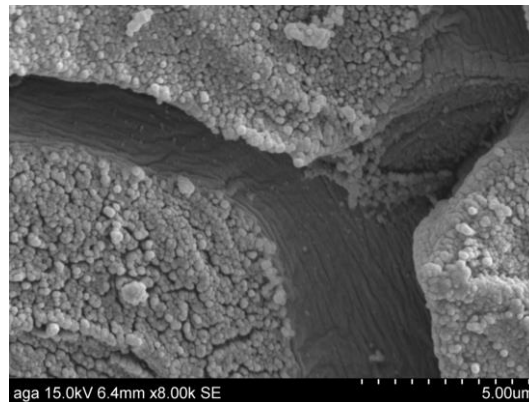


Figura 3.11. Vista de la altura de las células hexagonales presentes en el palmar, por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.

El diseño de la base hexagonal y la separación entre conglomerados mantiene el aumento de 1000. Además, las orientaciones de las partes superiores de los conglomerados se ubican de manera aleatoria.

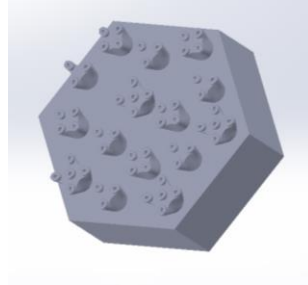


Figura 3.12. *Modelo tridimensional de celda bioinspirada con los conglomerados colocados de manera aleatoria. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.*

En este punto con la celda bioinspirada definida, se procede a realizar pruebas de prototipado, para corroborar que las características de los filamentos se repliquen debidamente en la resina utilizando impresión 3D. Parte del interés de estas pruebas es visualizar la escala mínima a la cual se puede prototipar, por lo que se imprime a varias escalas. El proceso de prototipado se detalla más adelante en la sección 3.5.

La primera prueba se hizo imprimiendo un ensamble compuesto por siete celdas hexagonales, con escalas del 100%, 70%, 50%, 30%, 20%, 10% y, 5%, siendo dimensionado en el software para impresión 3D Chitubox. Se pudo observar que: las cuatro escalas más pequeñas (30%, 20%, 10% y 5%) no replican ninguno de los detalles buscados; las escalas al 70% y 50 % logran un mejor prototipado de los conjuntos de filamentos, aunque no el detalle buscado en las ventosas; a la escala base (100%), el patrón presenta mejores detalles de toda la estructura, sin embargo, se buscan cavidades y separaciones entre filamentos más acentuadas para lograr un mejor molde.

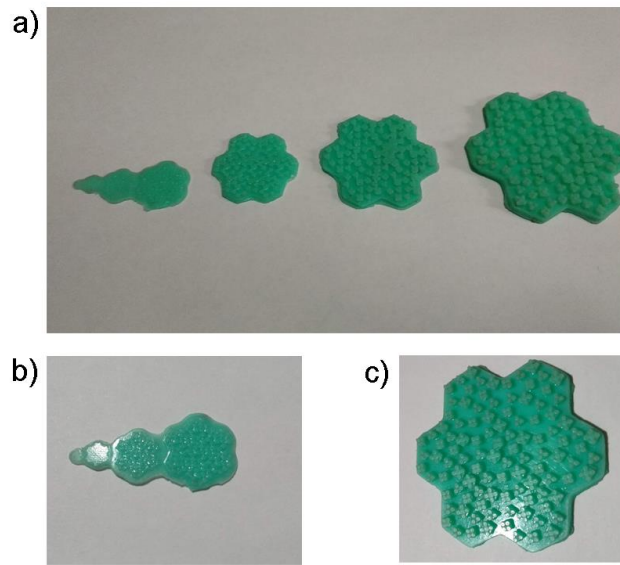


Figura 3.13. Primer prototipado 3D en resina a diferentes escalas de la celda bioinspirada ensamblado en un conjunto de siete: a) Escalas al 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 70% y, 100% (De izquierda a derecha); b) Detalle de la impresión a escalas de 5%, 10%, 20% y 30%; c) Detalle del ensamble a escala base (100%). Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.

Por las observaciones anteriores, se decide duplicar en el diseño del filamento la profundidad de la cavidad (ventosa), siendo entonces de 0.60 mm y, disminuir el espesor de pared a la mitad, es decir 0.10 mm, para realizar otra prueba de impresión esperando que estos detalles sean más perceptibles en la impresión en resina.

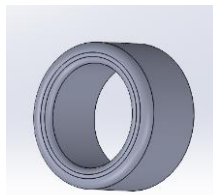


Figura 3.14. Modelado tridimensional del filamento queratinizado con profundidad duplicada y espesor de pared reducido a la mitad. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.

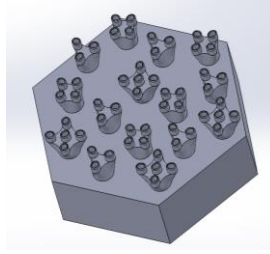


Figura 3.15. Celda bioinspirada modelada tridimensionalmente con el filamento queratinizado con profundidad duplicada y espesor de pared reducido a la mitad. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.

Adicionalmente, se incorporan al diseño la separación entre las placas hexagonales y las mesetas, para crear el espacio necesario para el paso y distribución del fluido. La separación se basa en los canales de $2\ \mu\text{m}$ presentes en el palmar de la *Lithobates vibicarius*, los cuales rodean las células hexagonales del anuro, visibles en la figura 3.16, modelados de $2\ \text{mm}$ en el diseño tridimensional realizado. Según la misma fotografía, se caracterizan dos tamaños de mesetas basados en sus dimensiones promedio y formas elípticas irregulares, una de $6\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ y, otra menor de $4\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$, las cuales se distribuyen de manera aleatoria en el diseño y se modelan con un aumento de 1000, continuando con lo establecido previamente.

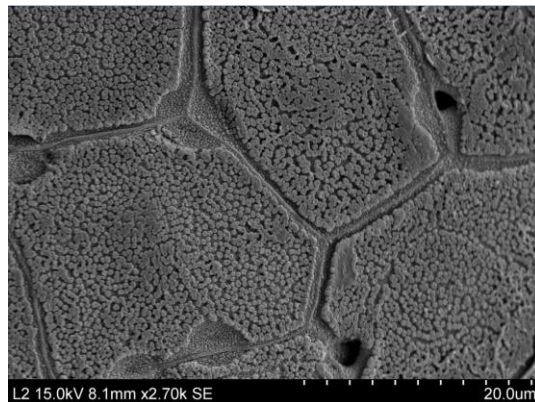


Figura 3.16. Canales y mesetas presentes en el palmar de la *Lithobates vibicarius*, por la Dra. Hennis Cavallini Solano, 2019.

Se realiza el ensamble tridimensional con la separación correspondiente (canales) entre cuatro celdas bioinspiradas con las ventosas de los filamentos acentuadas y los dos tamaños de meseta, para prototipar a distintas escalas.

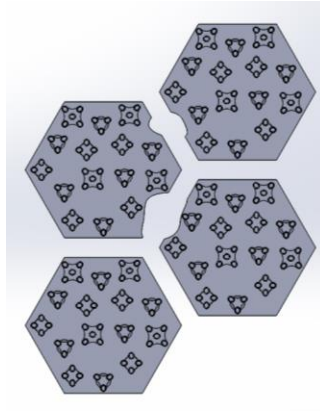


Figura 3.17. *Ensamble tridimensional con separación entre celdas con ventosas acentuadas y mesetas. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.*

En la figura 3.18, se muestran las agrupaciones celulares obtenidas de la segunda impresión 3D en resina. Se mantuvo la idea de obtener ventosas bien marcadas a escalas menores a la escala base, por lo que se imprimió al 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 70% y 100%, sin embargo, los resultados no fueron los deseados. Las ventosas de los filamentos se distinguen más fácilmente que en las impresiones anteriores, aunque aún no de la forma que se busca tener para la realización del molde.

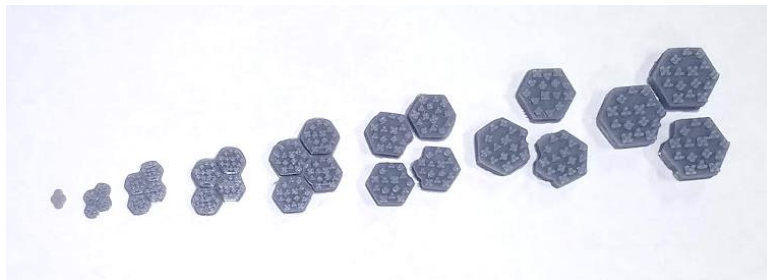


Figura 3.18. *Segundo prototipado 3D en resina a diferentes escalas de las agrupaciones celulares con ventosas de los filamentos acentuadas, ensamblado tomando en cuenta los canales y las mesetas. Escalas al 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 50%, 70% y, 100% (De izquierda a derecha). Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.*

Considerando que imprimir a escalas menores a la escala base diseñada no ha resultado en el nivel de detalle que se busca, se decide utilizar el mismo diseño de celda con las ventosas de los filamentos acentuadas en agrupación celular, para realizar la prueba de prototipado a escalas mayores a la escala base. Las escalas impresas fueron de 150% y 200%.



Figura 3.19. Tercera impresión 3D en resina a diferentes escalas de las celdas bioinspiradas con ventosas de los filamentos acentuadas ensamblado tomando en cuenta los canales y las mesetas. Escalas al 200% y 150% (De izquierda a derecha). Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.

La escala del doble del tamaño base se considera aceptable, según las características buscadas, en específico, las ventosas son más visibles y la separación entre filamentos dentro del conglomerado esta mejor prototipada. Al tomar en cuenta que el diseño base tiene un aumento de 1000 con respecto a la morfología presente en el anuro, se tiene entonces que la celda bioinspirada a replicar tendrá una escala de 2000 veces las dimensiones originales.



Figura 3.20. Celda bioinspirada con ventosas de los filamentos acentuadas a escala del 200% . Elaboración propia con la impresora 3D Phrozen Mini 4K, 2022.

Los planos finales de la celda bioinspirada y de la agrupación celular pueden ser visualizados en los apéndices 1 y 2.

3.1.2 Análisis Microscópico

La celda bioinspirada impresa a la escala seleccionada se observó con el microscopio electrónico de barrido (MEB) para captar a detalle la calidad de impresión de las características modeladas y otras particularidades presentes por el método de prototipado. Para su visualización en el microscopio, la celda hexagonal fue cubierta con una delgada capa de oro, haciendo uso de un cobertor iónico de la marca Denton Vacuum modelo Desk V.



Figura 3.21. Cobertor Iónico (Denton Vacuum Desk V) utilizado para la preparación de la celda bioinspirada para su visualización en el microscopio electrónico de barrido.

La figura 3.22 muestra la celda hexagonal durante y después del recubrimiento con oro. La necesidad de colocar una delgada capa de oro sobre la superficie de la muestra hecha con resina surge debido a la poca conductividad del material. En estos casos la práctica usual es recubrir con una capa muy delgada, que no afecte la estructura de la muestra, de oro o carbono, para obtener imágenes de alta calidad.

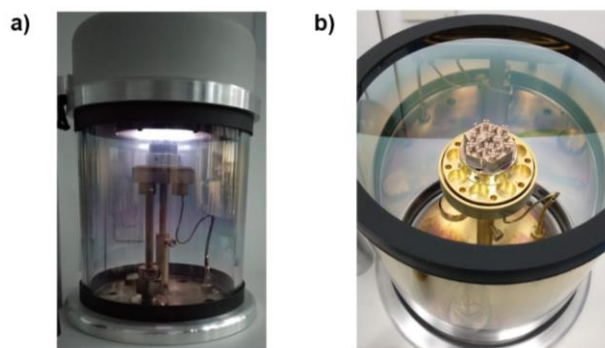


Figura 3.22. Celda bioinspirada impresa en resina dentro del cobertor iónico: a) Durante el proceso de cobertura, b) Al finalizar el proceso de cobertura.

Una vez la muestra ya ha sido preparada, se procede a montarla en el microscopio. El microscopio electrónico de barrido utilizado es de la marca JEOL modelo JSM-6390LV.

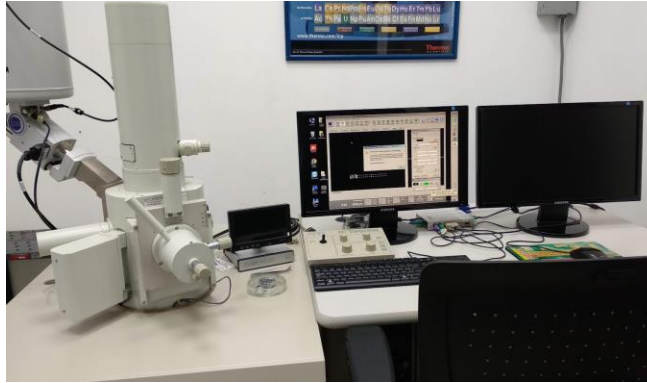


Figura 3.23. Microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-6390LV.

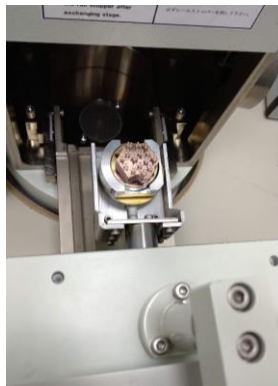


Figura 3.24. Celda bioinspirada montada en el microscopio electrónico de barrido listo para su visualización.

Al visualizar las estructuras magnificadas en la pantalla, se notó la presencia de fibras ajenas a la resina. En esta ocasión, la pieza no se limpió antes de cubrirse con oro, razón por la cual se tienen fibras adheridas. Las micrografías fueron obtenidas a un voltaje de 20 kV con diferentes aumentos.

En las imágenes del costado de la celda hexagonal de la figura 3.25, es posible visualizar el diseño de la meseta en la pared del mismo, además, de parte de la estructura de los conglomerados de filamentos. A aumentos de X13 y X14 es posible notar las capas de material producto de la técnica de prototipado.

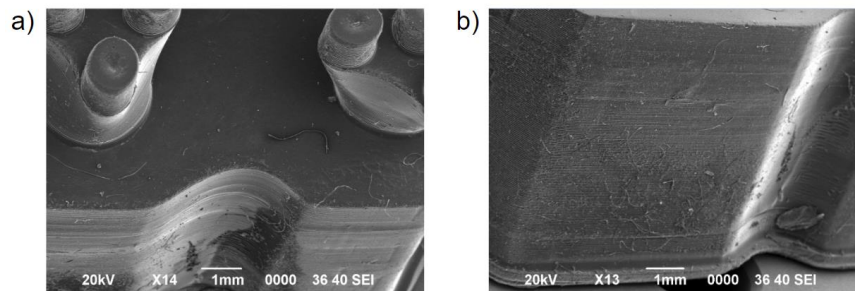


Figura 3.25. Morfología del costado de la celda hexagonal con meseta. a) vista parcial lateral-superior y, b) espesor de la celda bioinspirada. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.

Se brindó especial atención al resultado de impresión de los conglomerados. En la figura 3.26, se presenta la vista superior, con un aumento de 20, de los conglomerados de tres, cuatro y cinco filamentos. El resultado general del prototipado de los conglomerados es el esperado, siendo fiel al diseño realizado. En estas micrografías se pueden apreciar, además de las fibras observadas en las imágenes anteriores, filamentos de resina que se despegaron del resto de la estructura. Adicionalmente, se notan rayones y agujeros, producto de la impresión y posterior limpieza de resina residual (ver apéndice 12) hecha a la pieza.

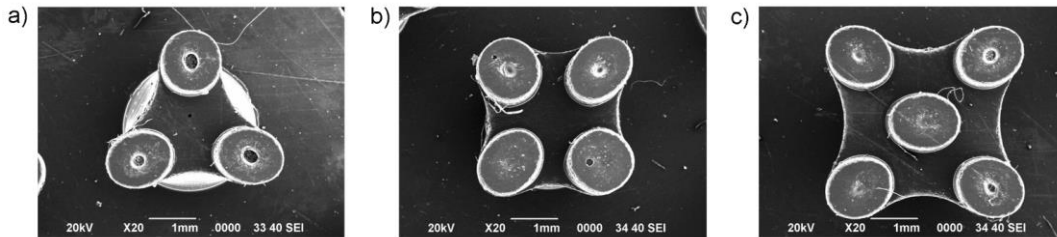


Figura 3.26. Morfología superior de la impresión 3D en resina de los conglomerados de a) tres filamentos, b) cuatro filamentos y, c) cinco filamentos. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.

Se procede a visualizar más detenidamente uno de los agujeros presente en un conglomerado de tres filamentos (ver figura 3.27). A 65 aumentos (figura 3.27.b) se ve más claramente la rugosidad presente en los bordes del filamento y el agujero. Al aumentar 200 veces (figura 3.27.c) es posible notar un descamamiento en la zona que rodea la cavidad y, en la figura 3.27.d (aumento x1000), se muestra su interior. En particular, estos agujeros concéntricos en el filamento coinciden con la zona en la cual se diseñó la profundidad de las ventosas, razón por la que se considera que son producto de la remoción del material residual en dichas zonas con espesores de capa menores.

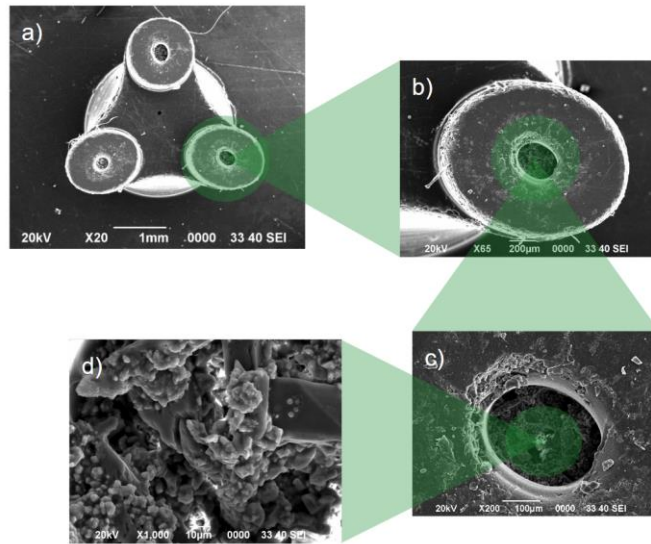


Figura 3.27. Imperfección presente en la ventosa del conglomerado de tres filamentos. a) Vista superior del conglomerado, b) Vista superior de uno de los filamentos con la imperfección, c) agujero presente en la ventosa del filamento y, d) interior del agujero. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.

Al analizar en detalle las ventosas de la celda, desde un aumento de 16 veces es perceptible el desnivel que poseen (figura 3.28.a). En las figuras 3.28.b y 3.28.c es posible notar la misma rugosidad mencionada anteriormente en los bordes del filamento, junto con partículas descolocadas en el centro. Este conglomerado no presenta agujeros, sin embargo, la profundidad de la ventosa, pese a ser perceptible, sigue sin ser la que se diseñó de 1.2 mm (figura 3.28.d). En concreto, la ventosa tiene una profundidad marcada de aproximadamente 100 μm , lo que equivale a poco menos de un décimo de lo que se diseñó, evidenciando que la técnica de prototipado no fue suficiente para lograr la dimensión.

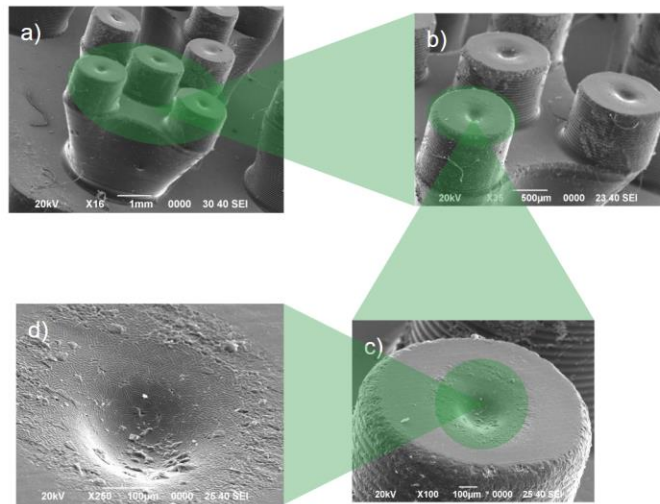


Figura 3.28. Detalle de la impresión de las ventosas de la celda bioinspirada en resina. a) conglomerado de cinco filamentos, b) filamentos, c) ventosa presente en el filamento y, d) magnificación de la ventosa. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.

De forma general, se analizó el resultado de la impresión 3D con resina llegando a notar cuatro imperfecciones en la pieza impresa: a) agujeros presentes en ciertas zonas de la celda, de diferentes dimensiones, b) rayones y descamamiento, c) bordes rugosos y, d) desprendimiento de material entre las capas.

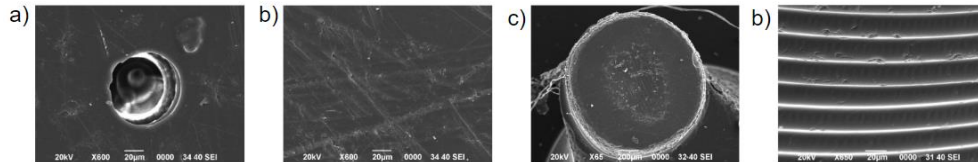


Figura 3.29. Imperfecciones halladas en la celda producida con impresión 3D con resina. a) Agujeros, b) rayones y descamamiento, c) bordes rugosos y, d) desprendimiento de material. Obtenidas con el microscopio electrónico de barrido, 2021.

3.2 Fluido de adherencia

Según se ha comentado en secciones previas de este documento, el mecanismo de adhesión de los anuros trabaja en presencia de un fluido el cual es segregado por sus glándulas mucosas. Dicha particularidad y sus notables capacidades de adhesión en diferentes superficies son lo que hace relevante el estudio del mecanismo en húmedo por el cual este organismo subsiste.

Entre las metas de esta investigación se tiene, además de diseñar una textura bioinspirada en la morfología presente en el callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*, realizar pruebas de adherencia con un fluido que se asemeje al moco segregado

por las ranas. Por esto, se seleccionan tres disoluciones a las cuales se les miden la viscosidad y los ángulos de contacto para posteriormente seleccionar el fluido a utilizar en las pruebas de adherencia.

3.2.2 Linaza

La semilla de lino o linaza es una de las fuentes vegetales más importantes de ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs - Polyunsaturated fatty acids), los cuales previenen enfermedades como las cardiovasculares, hipertensión, inflamación, entre otras (Becerra-Ramírez, 2017). El mucílago de la linaza es un fluido semejante a una goma que se asocia a las cascara de la semilla y, se constituye por polisacáridos ácidos y neutros (Figuerola et al., 2008). Esta goma de linaza “tiene buena capacidad espumante, estabilidad, resistencia a la presencia de sales y viscosidad estable en un amplio rango de pH” (Hall et al., 2006).

Al considerar la variedad de propiedades que pueden obtenerse con distintas proporciones de linaza, el origen 100% natural del fluido resultante y, su estabilidad a temperatura ambiente, la utilización del mucílago de linaza se considera una excelente opción para asemejar la mucosa del anuro. Se elige entonces trabajar con tres disoluciones de linaza en agua destilada, variando la masa de la semilla a agregar. En concreto, se utilizan 12.5 g, 18 g y, 25 g de linaza, cada uno en 250 mL de agua destilada. Las disoluciones fueron preparadas siguiendo el protocolo que se adjunta en el apéndice 3, basado en la metodología empleada por Becerra-Ramírez (2017) en su trabajo.



Figura 3.30. *Proceso de preparación de las tres disoluciones de linaza en agua destilada.*

Para facilitar el análisis de las disoluciones, se obtiene el porcentaje de masa entre volumen de las disoluciones, utilizando la ecuación (1).

$$\% = \frac{\text{masa (g) de soluto}}{\text{volumen (mL) de la solución}} \cdot 100 \quad (1)$$

La tabla 3.1 muestra los porcentajes de masa entre volumen de las disoluciones de linaza.

Tabla 3.1

Porcentajes de masa entre volumen de las disoluciones de linaza.

Contenido de linaza (g)	Porcentaje de masa entre volumen (%)
12.5	5
18	7.2
25	10

3.2.3 Ángulos de contacto

El método que estudia los ángulos de contacto consiste en depositar una gota del líquido (gota sésil, ver figura 3.31) a estudiar sobre una superficie plana, una película horizontal de líquido o un gel no miscible (Cerpa-Gallegos et al., 2014), con el fin de obtener el ángulo que forma la gota con respecto a la superficie. Conocido también como ángulo de mojado por su relación con la mojabilidad, el ángulo de contacto “depende principalmente de la relación existente entre las fuerzas adhesivas del líquido y del sólido y las fuerzas cohesivas del propio líquido” (Rodríguez-García-Cebadera, 2010).

La mojabilidad es la capacidad de los sólidos de formar interfases con los líquidos, siendo el ángulo de contacto la variable que determina la mojabilidad de un sólido con respecto a cierto líquido (Rodríguez-García-Cebadera, 2010). Según Stamm (2008), existen tres tipos de mojabilidad: mojabilidad completa ($\theta=0$), mojabilidad parcial ($0<\theta<90^\circ$) y no mojabilidad ($90^\circ\leq\theta$). También es posible catalogar la superficie como hidrofóbica ($\theta>90^\circ$) o hidrofílica ($\theta<90^\circ$) (Romero-García, 2019).

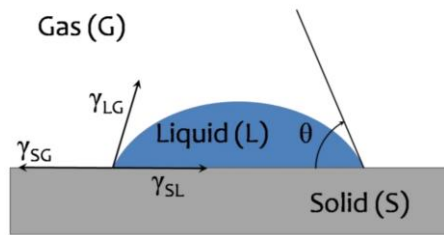


Figura 3.31. Representación esquemática de una gota sésil de líquido (L), reposando en equilibrio sobre una superficie sólida horizontal (S) en una atmósfera de gas (G), con el ángulo de contacto (θ) y tensiones en el punto triple (γ). Fuente: Rodríguez-García-Cebadera, 2010.

Para medir los ángulos de contacto se utilizó un goniómetro (ver figura 3.32) de la marca Ramé-hart, modelo 250-F1. Mediante el uso de este equipo se tomaron fotografías de las gotas de las tres disoluciones, y, de agua destilada como referencia. Se tuvo la consideración de realizar los ensayos en un mismo día y en dos superficies diferentes para tener más bases para comparar.

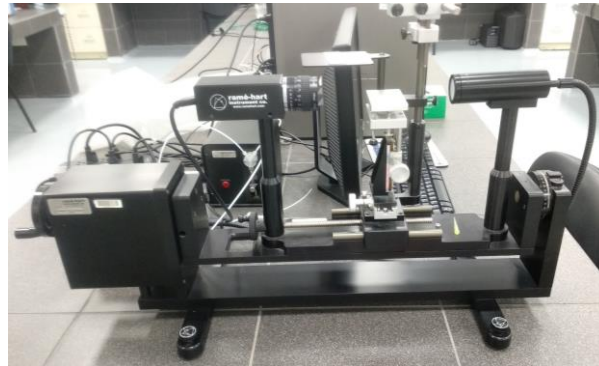


Figura 3.32. Goniómetro de la marca Ramé-hart, modelo 250-F1.

Primero, se obtuvieron resultados poniendo las gotas sobre acero 304 limpio con acetona mediante lavado ultrasónico por 5 minutos, secado posteriormente con aire comprimido (ver Tabla 3.2). Se trabajó con muestras 5 μ L, las cuales se colocaron mediante el uso de una micropipeta, con diferentes puntas, sobre el acero, realizando tres repeticiones (3 gotas, 1 foto por gota) por fluido.



Figura 3.33. Máquina de limpieza por ultrasonido marca Branson modelo 2510 (Izquierda) y placa de acero 304 dentro de tubo falcón (derecha).

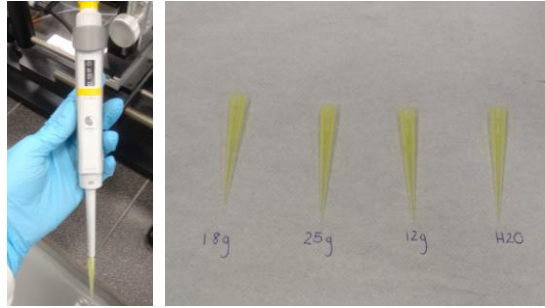


Figura 3.34. Micropipeta configurada para trabajar con un volumen de 5 μL (Izquierda) y las puntas de micropipeta empleadas para cada fluido (derecha).

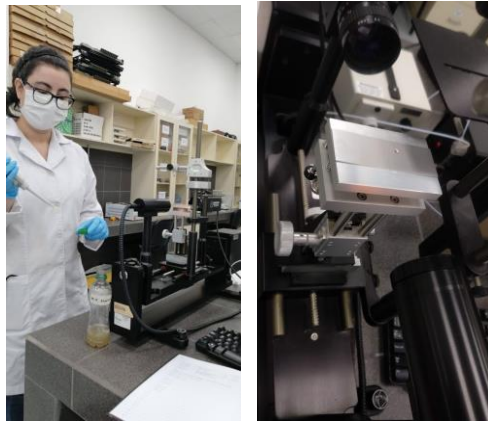


Figura 3.35. Colocación de la gota en el goniómetro utilizando la micropipeta (Izquierda) y gota sobre la placa de acero 304 (derecha).

Las gotas junto con sus respectivas capturas fueron observadas y posteriormente guardadas utilizando el programa DROPimage Advanced (ver figura 3.36). Las fotografías obtenidas con el goniómetro son a blanco y negro con la gota centrada y enfocada en el lente (ver apéndices 4 y 5). Se almacenaron los archivos con códigos para identificarlos con facilidad. Las primeras muestras obtenidas se nombraron AA, para referenciar la placa limpia en acetona en la cual se realizaron las pruebas, seguido de una descripción correspondiente al fluido y el número de repetición.

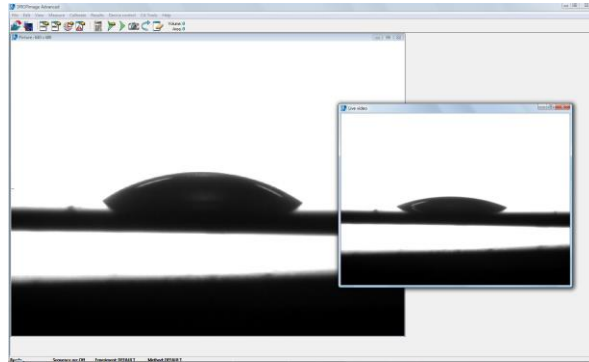


Figura 3.36. Captura de pantalla de una gota en el goniómetro siendo visualizada en el programa DROPIimage Advanced.

Se midieron los ángulos de contacto derecho e izquierdo por medio del programa ImageJ (Ver figura 3.37). Cada ángulo obtenido se considera una medición, por lo que de cada líquido se tienen seis mediciones.

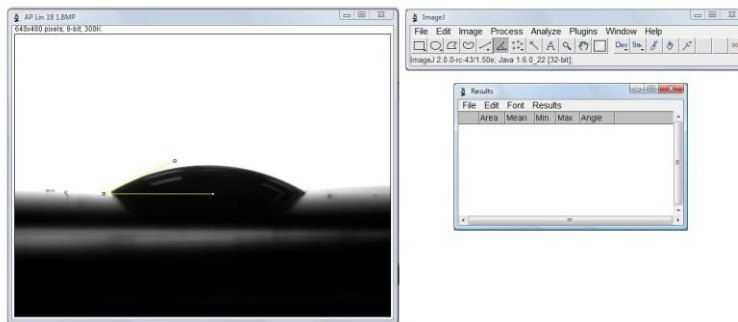


Figura 3.37. Captura de pantalla de la medición de ángulo con el programa ImageJ.

Tabla 3.2

Ángulos de contacto obtenidos de las disoluciones de linaza y agua, en acero 304 limpio con acetona por 5 minutos en lavado ultrasónico, secado con aire comprimido.

Código	Datos [°]	
AA H2O	65.973	64.134
	65.026	65.179
	65.659	63.789
AA Lin12.5	67.870	68.749
	67.166	70.989
	70.017	68.593
AA Lin18	74.745	74.827
	76.115	72.777
	73.811	74.864
AA Lin25	64.855	57.579
	62.745	62.650
	59.237	62.063

AA: Acero lavado en Acetona.

Posteriormente, se tomaron los datos observables en la tabla 3.3, limpiando otra vez la placa de acero 304 con el mismo procedimiento anterior, aunque esta vez cubriendo la cara superior de la placa con plasma, una superficie hidrofílica. Las siglas utilizadas en estos archivos para identificar las muestras fueron AP,

referenciando el acero cubierto con plasma, seguidas de una descripción correspondiente al fluido y el número de repetición.

Tabla 3.3

Ángulos de contacto obtenidos de las disoluciones de linaza y agua, en acero 304 limpio con acetona por 5 minutos en lavado ultrasónico, secado con aire comprimido y cubierto con plasma.

Código	Datos [°]	
AP H2O	21.915	22.620
	19.885	22.620
	22.533	22.011
AP Lin12.5	25.641	25.787
	26.307	26.249
	26.816	26.757
AP Lin18	24.835	24.937
	23.962	24.404
	24.034	24.806
AP Lin25	41.845	42.109
	41.348	40.280
	41.455	40.192

AP: Acero lavado en acetona cubierto en Plasma.

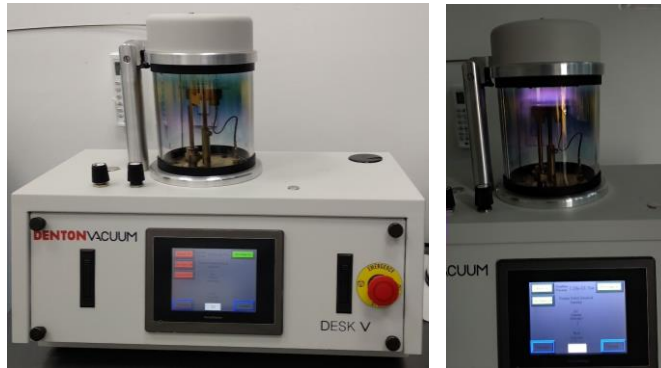


Figura 3.38. Placa de acero 304 dentro del cobertor iónico antes (Izquierda) y durante su cobertura con plasma (derecha).

Para el análisis de datos se utilizó la técnica estadística del análisis de varianza (ANOVA). Esta técnica “es útil cuando hay más de dos grupos que necesitan ser comparados, cuando hay mediciones repetidas en más de dos ocasiones, cuando los sujetos pueden variar en una o más características que afectan el resultado y se necesita ajustar su efecto o cuando se desea analizar simultáneamente el efecto de dos o más tratamientos diferentes” (Dagnino, 2014).

Los ángulos de contacto se estudian con el análisis de varianza de una vía, ya que existe una sola variable independiente para clasificar las muestras y más de dos niveles, los cuales definen los grupos, de ella (Dagnino, 2014). Para realizar el estudio del ANOVA, se hace uso de la herramienta presente en la página <https://www.socscistatistics.com/tests/anova/default2.aspx> , la cual incluye también la prueba de Tukey. Las muestras se introdujeron en el mismo orden de las tablas de datos presentes en párrafos anteriores, por lo que en ambos ensayos el orden de sets de los fluidos es el siguiente:

Tabla 3.4

Identificación del orden de los sets utilizados en las pruebas ANOVA y Tukey.

No. Set	1	2	3	4
Fluido de la Muestra	Agua Destilada (H ₂ O)	Linaza 12.5 g (Lin12.5)	Linaza 18 g (Lin18)	Linaza 25 g (Lin25)

La prueba de Tukey, conocida también como Diferencia Honestamente Significativa de Tukey (Honestly Significant Difference - HSD), es utilizada cuando el análisis de varianza da un resultado significativo. Esta técnica sirve para analizar en específico las diferencias entre los promedios obtenidos de las muestras (Abdi & Williams, 2010).

Según el análisis realizado a los datos de las gotas sobre la placa de acero limpia sin plasma, el cual se encuentra en el apéndice 6, a un 95% de confianza los resultados son significativos. La prueba Tukey indica que todos los promedios presentan diferencias significativas. A continuación, se presentan los promedios y desviaciones estándar obtenidos de los ángulos de contacto de los fluidos sobre la placa de acero limpia sin cubrir:

Tabla 3.5

Ángulos de contacto promedio y desviaciones estándar de los fluidos ensayados sobre la placa de acero 304 limpia sin cubrir de plasma.

Fluido de la Muestra	Agua Destilada (H ₂ O)	Linaza 5% (Lin12.5)	Linaza 7.2% (Lin18)	Linaza 10% (Lin25)
Ángulo de Contacto promedio (°)	64.960	68.897	74.523	61.521
Desviaciones Estándar (°)	0.851	1.400	1.127	2.643

En la tabla 3.5 es posible observar que los tres fluidos presentaron ángulos de contacto similares, por lo que su mojabilidad se puede decir que es semejante. La disolución de 10% de linaza fue la que menor ángulo de contacto obtuvo mientras que la de 7.2% de linaza fue la que tuvo ángulos mayores (74.523° en promedio).

El análisis que se realizó a los ángulos de contacto de los fluidos sobre la placa de acero cubierta con plasma, también al 95% de confianza, se encuentra en el apéndice 7. Según este análisis, los resultados son significativos, y todos los promedios presentan diferencias significativas entre ellos, igual que los datos anteriormente analizados. En la tabla 3.6 se presentan las desviaciones estándar y los promedios obtenidos de estos datos.

Tabla 3.6

Ángulos de contacto promedio y desviaciones estándar de los fluidos ensayados sobre la placa de acero 304 limpia cubierta de plasma.

Fluido de la Muestra	Agua Destilada (H ₂ O)	Linaza 5% (Lin12.5)	Linaza 7.2% (Lin18)	Linaza 10% (Lin25)
Ángulo de Contacto promedio (°)	21.931	26.259	24.496	41.205
Desviaciones Estándar (°)	1.049	0.483	0.427	0.799

En el acero cubierto en plasma, la disolución hecha con 10% de linaza resultó tener el ángulo de contacto mayor, siendo de 41.205° en promedio. Por el otro lado, el agua destilada fue el fluido que más mojó esa superficie. Las otras dos disoluciones de linaza tuvieron resultados cercanos al del agua.

3.2.4 Viscosidad

Conceptualizada como la oposición que presenta un fluido a las deformaciones graduales que son producidas por un esfuerzo de corte (Cifuentes & Nicolás, 2016), la viscosidad es una de las propiedades reológicas más estudiadas. Dicha propiedad influye directamente en el flujo que tienen los fluidos, siendo entendida por Ortiz-Domínguez & Cruz-Avilés (2022), como un fenómeno de transporte, ya que, junto con la difusión y conducción de calor, nivelan propiedades intensivas del medio mediante el transporte molecular de determinadas propiedades extensivas.

Torres-González (2020), mencionan que la viscosidad depende de la composición del fluido, su presión y la temperatura, aunque destaca que la temperatura es la que tiene una influencia más perceptible en el fluido. En el caso de los líquidos, entre mayor sea la temperatura, menor es la viscosidad, debido a que las “moléculas adquieren una mayor movilidad y se resisten menos a fluir” (Torres-González, 2020). Por esto, las mediciones se realizaron con las disoluciones de linaza a temperatura ambiente, siendo en este caso la temperatura de trabajo.

Hay dos tipos de viscosidad: la cinemática (ν) y la dinámica o absoluta (μ). La viscosidad cinemática, es función de la viscosidad dinámica en Pa · s y de la

densidad del fluido en kg/m^3 , a la misma temperatura y presión, y, se utiliza para “conocer el impacto que tienen las fluctuaciones de temperatura en un fluido” (Torres-González, 2020). Por otro lado, la viscosidad absoluta depende del esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad (Torres-González, 2020). La viscosidad cinemática se expresa mayormente en centistokes (cSt) y la dinámica en centiPoise (cP) o pascales por segundo ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) (Cedeño-González et al., 1999).

La viscosidad es “determinada a partir de mediciones de velocidad de corte y de esfuerzo cortante mediante el uso de modelos reológicos de regresión (no lineales)” (Gómez-Arias et al., 2009). Usualmente, esta propiedad se cuantifica a partir del uso de viscosímetros rotacionales (Saha & Bhattacharya, 2010), cuyos accesorios varían según el rango de viscosidad del fluido.

Las presentes mediciones de viscosidad se realizaron con el viscosímetro Rotavisc-LO-Vi-HELI SP1-2 (ver tabla 3.7). Los resultados obtenidos se reportan en centipoise (cP), los cuales son equivalentes a milipascales por segundo ($\text{mPa} \cdot \text{s}$).

Tabla 3.7

Datos de viscosidad dinámica de las disoluciones de linaza.

Fluido	Agua Destilada		Linaza 5%	Linaza 7.2%	Linaza 10%
Viscosidad a 24 °C Promedio de 20 mediciones (cP)	0.91 Reportada	0.92 Medida	1.9	1.7	4.0

Según lo esperado, la viscosidad del agua fue la menor y la de la linaza al 10% la mayor, su diferencia fue de 3.08 cP. La diferencia entre las muestras al 5% y 7.2% es de tan solo 0.2 cP, resultando mayor la viscosidad de la disolución al 5%, lo cual puede considerarse inicialmente extraño. Resulta importante aclarar que la viscosidad producto de la linaza depende de la calidad del mucílago y la forma en que la misma se prepara (ver apéndice 3), por esta misma razón, no hay reportes exactos de valores de viscosidad.

3.2.5 Fluido Seleccionado

Para la selección de un fluido que se asemeje a la mucosa de los anuros, se tienen datos de viscosidad encontrados. Federle y colaboradores (2006), midieron viscosidades de mucosas utilizando tres ranas diferentes, obteniendo datos que iban de 1.25 mPa·s a 1.51 mPa·s, cuyo promedio resultó de 1.43 mPa·s. Al comparar estos datos con los obtenidos en la tabla 3.7 se observa que las muestras de linaza al 5% y 7.2% son las que menor diferencia tienen con respecto al promedio hallado por los autores (diferencias de 0.47 mPa·s y 0.27 mPa·s, respectivamente), siendo levemente mayores las viscosidades obtenidas en las muestras de linaza. Sobre estas dos muestras, el estudio de mojabilidad realizado también encontró comportamientos y ángulos de contacto similares. Entonces, se elige la muestra de linaza al 5%, considerando que su menor contenido de mucílago disminuye el tiempo de fermentación, lo que favorece la preservación de la muestra a ambiente.

Las pruebas se realizan con agua teñida con café y con glicerina. En el primer caso, el agua con café sirve para mostrar más claramente como fluye el líquido en los diferentes escenarios por su color, además de que el café no altera las propiedades del fluido. En el segundo caso, pese a que la glicerina es un producto más viscoso (1.2 Pa·s (Pedrós, 2013)), no debe prepararse, posee propiedades estables y, no se deteriora con el tiempo, por lo que su practicidad resulta clave en la realización eficiente de las pruebas.

Entonces, se elige la disolución de linaza al 5% como el fluido más apto para asemejar el moco segregado por las ranas, pero se utiliza glicerina en la etapa de pruebas con el propósito de optimizar los tiempos necesarios a dedicar en la realización de los ensayos, por la versatilidad que brindan las propiedades de este fluido.

3.3 Materiales para el prototipado

Teniendo la misma ideología de González & Mesa (2004), quienes mencionan que “una adecuada selección de materiales y procesos garantiza a los diseñadores de partes mecánicas su correcto funcionamiento (performance) de los componentes diseñados”, resulta necesario dedicar una sección completa a recabar la principal información relacionada a los materiales seleccionados para el prototipado del proyecto. Además, siendo la ciencia y tecnología de materiales gran parte de la formación de un ingeniero mecánico, se sabe que un diseño no puede estar completo sin tener claro cuáles, por qué y de qué forma, los materiales deben ser incorporados al momento de su construcción, siendo clave conocer las principales propiedades de los mismos.

3.3.2 PLA

Conocido popularmente como PLA, el ácido poli láctico (Polylactic acid) es uno de los termoplásticos más utilizados en la impresión 3D (Beltrán et al., 2021). En particular, ha captado la atención de los usuarios por su balanceada procesabilidad y desempeño (Agüero et al., 2019) y, por sus características sustentables y compostabilidad (Arrieta et al., 2017).

Según Wittbrodt y Pearce (2015), el color del PLA influye en las propiedades mecánicas del material. La investigación de Miranda-Fernandes (2018), se realizó con PLA blanco, similar al que se utiliza en la impresión de los moldes con canales de este proyecto (ver sección 3.5.2.1), por lo que sus datos se relacionan directamente.

Tabla 3.8

Propiedades mecánicas del PLA blanco.

Esfuerzo de Tensión Última (σ_u) [MPa]	Límite Elástico (σ_{Yld}) [MPa]	Módulo de Elasticidad (E) [GPa]	Alargamiento a la rotura (ϵ_R) [%]	Tenacidad (T) [J/cm ³]
20.71	17.27	1.04	3.33	0.46

Nota: Datos obtenidos de Miranda-Fernandes (2018), con los siguientes factores:

Densidad de Relleno: 20%

Temperatura de extrusión: 200 °C.

Espesor de capa: 0.1 mm.

En general, se sabe que entre mayor sea la densidad del relleno (más material en la pieza), mejores son las propiedades del material (Miranda-Fernandes, 2018). Otras de sus características son su hidrofobicidad y un comportamiento de deformación menor al del ABS (Tümer & Erbil, 2021).

3.3.3 Resina Fotosensible

La impresión de los patrones hechos inicialmente para seleccionar la escala de prototipado y, la de los moldes cuyo diseño incluye la celda bioinspirada, fueron realizadas con resina. Específicamente, se utilizó la resina Phrozen Aqua 4K - Gris,

siendo un producto del fabricante de la impresora empleada (Phrozen Sonic Mini 4K).

La resina empleada se cataloga como fotosensible, por lo cual se cura mediante un proceso de fotopolimerización (Pazhamannil et al., 2022). Los materiales fotocurados tienden a ser frágiles, fáciles de deformar, resistentes a la intemperie y, de baja biocompatibilidad, por lo que su uso mayoritariamente es como piezas de reemplazo temporal o modelos (Quan et al., 2020). El vendedor del producto provee más información sobre las propiedades mecánicas del material (ver tabla 3.9).

Tabla 3.9

Propiedades mecánicas de la resina Phrozen Aqua 4K - Gris.

Densidad [g/cm ³]	Viscosidad [cP]	Dureza Superficial	Esfuerzo de Tensión Última [MPa]	Módulo de Elasticidad [MPa]
1.10	210-310	80 Shore D	24	1037

Nota: Datos obtenidos de Phrozen (s.f.).

3.3.4 Caucho de Silicona

El prototipo se elabora en su totalidad con caucho de silicona. La silicona, como describe Tapia-Rodríguez (2022), “es un derivado de la roca de cuarzo combinado a altas temperaturas con carbono”, dicho de otra forma, un caucho a base de sílice con el cual es posible obtener geles, aceites y sólidos.

Entre las características que presenta este polímero están su resistencia a las altas temperaturas (de 60 °C hasta 300 °C) y su flexibilidad con altos rangos de trabajo, pudiendo también mezclarse con auxiliares para obtener una goma más rígida (Tapia-Rodríguez, 2022), razones por las que se decidió utilizar este material para la construcción del prototipo. El caucho de silicona, una vez solidificado, se convierte en un material de naturaleza sólida, elastomérico. Los principales usos de este material se dan en aplicaciones de productos de alta precisión dimensional y, en los cuales se requiere un acabado suave (Tapia-Rodríguez, 2022). Su uso es también muy extendido en la industria médica.

En específico, el material utilizado es caucho de silicona catalizado con platino, por lo que se le conoce comercialmente también como silicona de platino. El producto adquirido es el Ecoflex 00-50, de la marca Smooth-On, cuya presentación comercial

incluye dos disoluciones las cuales deben mezclarse en partes iguales para conseguir la mezcla capaz de solidificarse. Particularmente, este caucho de silicona fue seleccionado por sus propiedades mecánicas, por el éxito de su aplicación en proyectos similares al actual (Shepherd et al., 2011; Mirvakili et al., 2021) y, por sugerencia del artista Jonathan Torres Rodríguez.

Las principales especificaciones del material vienen dadas por el fabricante dentro del empaque. En la tabla 3.10 se recopilan algunas de las principales propiedades.

Tabla 3.10

Propiedades mecánicas de la silicona de platino Ecoflex 00-50, marca Smooth-On.

Gravedad Específica [g/cm ³]	Tiempo de Curado [h]	Dureza Superficial	Esfuerzo de Tensión Última [psi]	Módulo de Elasticidad [psi]
1.07	3	50 Shore 00	350 (2.41 MPa aprox.)	12 (0.08 MPa aprox.)

Nota: Datos provistos por el fabricante Smooth-On.

Referente a la temperatura de trabajo, se especifica que el material es útil de -53 °C a 232 °C.

El artista Jonathan Torres Rodríguez, asesor del presente trabajo, mencionó que el caucho de silicona tiene problemas para catalizar cuando se utilizan moldes de resina, razón por la que para solventar este inconveniente se sigue la metodología detallada en el apéndice 12. Tal conocimiento deriva de la experiencia obtenida por el artista al trabajar con el material.

3.4 Diseño de Moldes

Con el fin de crear un prototipo funcional, resulta necesario usar moldes para chorrear el material en ellos. Los moldes se diseñan para crear formas y características complejas con un alto nivel de precisión y repetibilidad. En esta sección, se discutirán las consideraciones clave para el diseño de moldes.

En total se diseñaron cuatro moldes, dos con canales y otros dos texturados. Todos mantienen una forma elíptica alargada y plana, inspirada en el área superficial que presentan varias especies de babosas, entre ellas la *Veronicella floridana*. Este animal también segrega mucosa, pero su locomoción difiere a la de los anuros ya

que se desplazan continuamente en el sustrato, aunque su cuerpo no hace un contacto regular con el suelo (Cook, 1987).

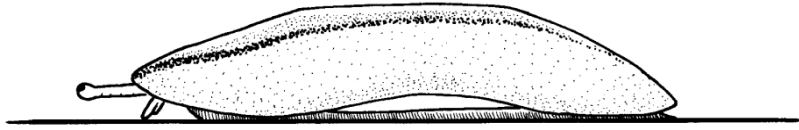


Figura 3.39. *Veronicella floridana* en movimiento dibujada a partir de una fotografía por Cook (1987).

El diseño se conceptualiza simple, con la idea central de que sea capaz de doblarse. Además, se toman en cuenta las dimensiones máximas trabajables por la impresora de resina, la cual se requiere para la impresión de dos de los moldes (ver sección 3.5.2.2). Las dimensiones máximas de impresión son 134 x 75 x 130 mm, lo que a grandes rasgos equivale a un área superficial de 13 x 7 cm. Basado en lo anterior, se plantea que el prototipo tenga un radio mayor de 12 cm y un radio de menor de 5 cm, aprovechando la mayor parte de la zona de impresión. Adicionalmente, se define una pared de 5 mm para el molde.

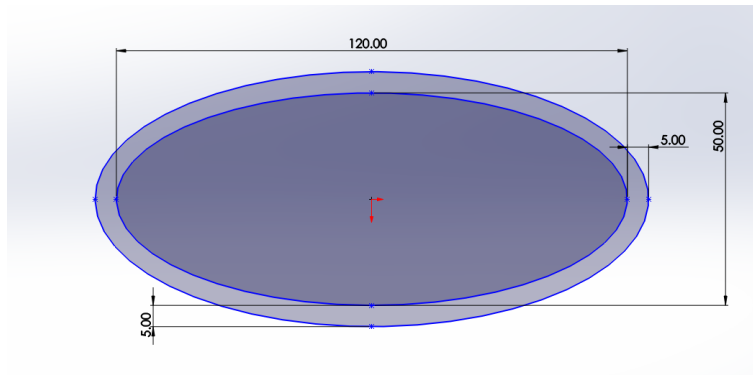


Figura 3.40. Bosquejo con las dimensiones para el molde del prototipo. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.

3.4.2 Moldes con canales

Estos moldes definen los canales necesarios el funcionamiento tanto del sistema neumático, encargado del movimiento mediante cambios en la presión del aire, como del sistema de humectación, el cual segrega el fluido equivalente a la mucosa. Los canales principales, es decir los que dirigen el aire, se basan en el diseño de Shepherd y colaboradores (2011), aunque buscando un resultado más orgánico que pueda verse como las vértebras del prototipo.

Manteniendo la idea anterior como base, se dibuja un canal central de 3 mm de espesor, que atraviesa al prototipo casi en su totalidad. Uno de los lados del canal central converge con la pared del molde siendo la zona para la entrada del aire. También, se bosquejan canales ramificados con un espesor mayor (5 mm), para distribuir proporcionalmente el fluido por los lados del prototipo. Estos canales ramificados se diseñan con largos escalonados, colocando los canales más largos en el centro y reduciendo su largo conforme se acercan a los extremos. La altura de todos los canales es de 5 mm y, resulta importante mencionar que, el centro del prototipo se conceptualiza con un trayecto más largo sin ramificar para propiciar la deformación en los extremos.

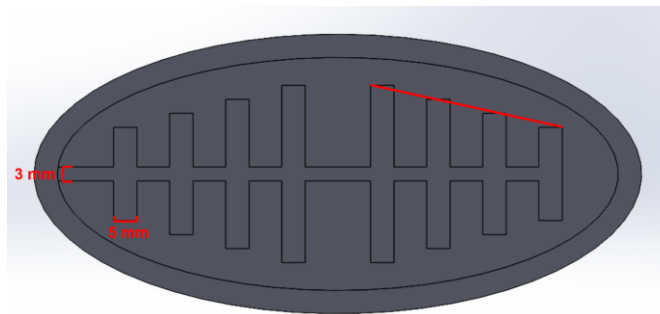


Figura 3.41. *Diseño de los canales de aire. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.*

Con las especificaciones mencionadas anteriormente, se define el primer molde (ver figura 3.41), con canales para el sistema neumático. Su profundidad se sobredimensiona, siendo de 2 cm, para definir el espesor de la capa al chorrear el caucho de silicona y, a la vez proteger la pieza durante su curado de posibles agentes externos o el cambio de posición. El plano del molde se presenta en el apéndice 8.

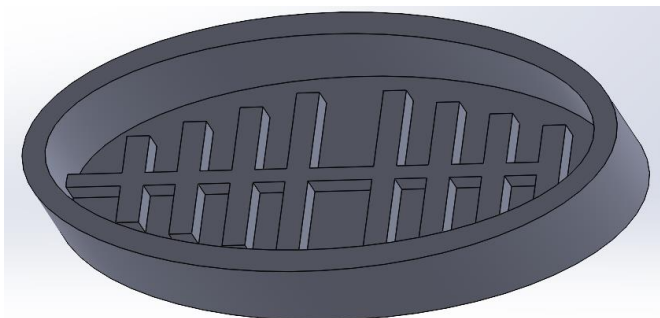


Figura 3.42. *Diseño final del molde con canales para el sistema neumático. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.*

Posteriormente, se diseña otro molde con canales, a partir del molde previamente realizado. Este nuevo molde adiciona canales para el trasiego del fluido que actúa como la mucosa del prototipo. Se decide que la mejor alternativa es que los canales se direccionen por los bordes laterales, aprovechando el espacio que no utiliza el sistema neumático, pero a la vez, ramificando hacia el interior del prototipo para facilitar la segregación del fluido en la superficie.

La entrada del fluido se traza en el extremo opuesto a la entrada del aire. Los canales para la mucosa se hacen más estrechos, 2 mm, y, teniendo una entrada de 3 mm. Debido a que se trasegará un líquido a través de ellos, se plantean bordes curvos para los cambios de dirección. Los largos de los canales se conceptualizan

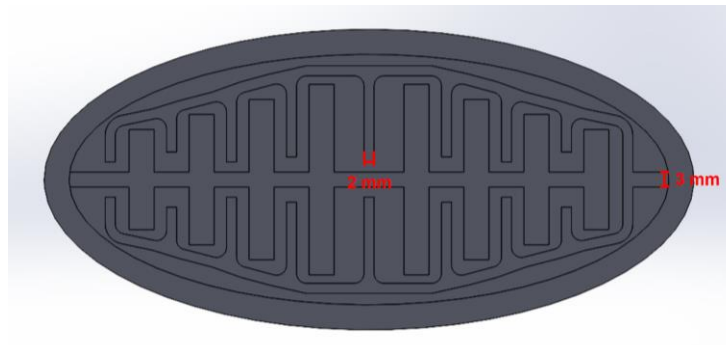


Figura 3.43. *Diseño de los canales para la mucosa. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.*

La profundidad de los canales se define de 2 mm, menor a la de los canales para el aire. Además, la profundidad interna del molde se mantiene de 2 cm, como en el caso anterior. El diseño final de este molde se detalla en el plano del apéndice 9.



Figura 3.44. *Diseño final del molde con canales para el sistema neumático y para el sistema de humectación. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.*

3.4.3 Moldes Biotexturales

Parte fundamental de este trabajo radica en plasmar la superficie biotexturada en el elemento prototipado. En este caso, la creación de un molde que sea capaz de replicar la estructura diseñada en base a la presente en la *Lithobates vibicarius* es crítico para su materialización. El diseño de un molde capaz de generar esta textura requiere ciertas consideraciones especiales debido a lo complejas que pueden ser las estructuras basadas en las que se observaron en la naturaleza.

Se toma la decisión de diseñar dos moldes, uno cuyo uso es directo, y otro, con el cuál se chorrea el material para crear otro molde. Esta consideración pretende anticipar algún inconveniente en el primer molde que afecte su utilidad, teniendo en cuenta que la textura a replicar es compleja y puede no ser lograda de prototipar en negativo. El método de prototipación de estas piezas se detalla en la sección 3.5.2.2.

Para el diseño de ambos moldes, primero se modela la superficie texturada deseada (ver figura 3.45). Se define una base elíptica con las dimensiones de radio mayor y menor trabajadas anteriormente, y un espesor de 3 mm, ya que se busca producir una capa delgada que se también se deforme ante los cambios de la presión interna. Sobre esta base se colocan varias agrupaciones celulares (ver apéndice 2), con orientaciones diferentes, de los cuales se recortan los excedentes que sobresalen de la base. Se eliminan filamentos y estructuras flotantes, y con espesores que se consideran no prototipables.

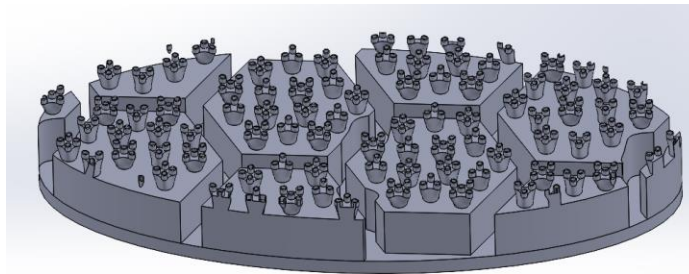


Figura 3.45. Modelo de la superficie texturada deseada. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.

El primer molde se modela a partir de un bloque con las dimensiones de la zona de impresión, al cual se le crean las cavidades correspondientes, aprovechando la operación cavidad del programa solidworks, tomando el modelo de la superficie deseada como referencia. Luego el mismo se recorta para eliminar las esquinas. En este caso, el molde quedo con un corte recto en uno de los extremos producto del recorte hecho al bloque, sin embargo, no afecta el resultado final. La correcta impresión de este molde brinda la oportunidad de simplificar la obtención de la biotextura. El plano de este molde se adjunta en el apéndice 10.



Figura 3.46. Molde biotextural en negativo con las dimensiones del prototipo. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.

El segundo molde biotextural se diseña pensando en utilizarlo para hacer el molde final de la biotextura en caso de que el molde anterior no sea funcional. A grandes rasgos, se crea usando de base el modelo deseado adicionando unos bordes internos, para que al momento de chorrear el material se produzca una pared. Estos bordes internos se plantean con un espesor de 2 mm, dejando 3 mm para el borde externo. La profundidad de la pared interna es de 2.8 mm desde la base de la superficie deseada. El plano del molde con la textura bioinspirada se presenta en el apéndice 11.



Figura 3.47. Espesor de las paredes internas y externas del molde biotextural. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.

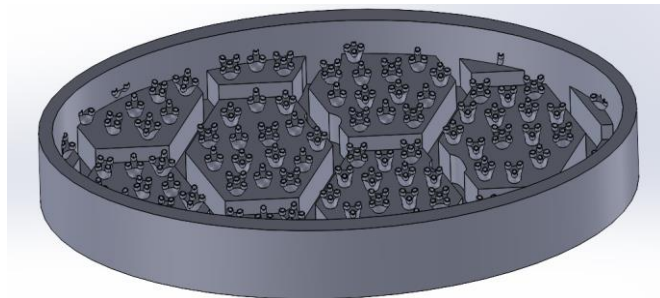


Figura 3.48. Molde biotextural. Elaboración propia con el programa SolidWorks, 2022.

3.5 Prototipado

Básicamente, el proceso de prototipación del elemento flexible bioinspirado consiste en la impresión de los moldes, y posteriormente, el chorreo del caucho de silicona, el cual incluye la materialización de las capas diseñadas y su ensamble. Además, se incorporan los accesorios necesarios para su funcionamiento.

3.5.2 Moldes

Los moldes fueron hechos con impresión 3D, conocida también como manufactura aditiva (Feng et al., 2018). Este proceso consiste en materializar modelos computacionales tridimensionales mediante la colocación selectiva de capas de material (Bourell, 2016). Se caracteriza por ser un método de prototipado rápido con excelentes resultados aun en estructuras complejas. Además, se considera como un proceso de bajo costo y muchas posibilidades. Entre sus desventajas actuales se tiene la resistencia que soportan las piezas, ya que la adhesión interfacial entre filamentos impresos es débil, y sumado a esto, el grado de porosidad de la capa intermedia, induciendo una propiedad heterogénea en el material (Feng et al., 2018).

En este proyecto, los moldes fueron impresos en PLA (Ácido Poli láctico) y resina, utilizando en el primer caso el método de modelado por deposición fundida (FDM / Fused Deposition Modeling) y, en el segundo estereolitografía (SLA /Stereo Lithography Appearance), la cual emplea un láser UV que cura la resina líquida hasta solidificarla por medio de fotopolimerización.

3.5.2.1 Moldes con canales

La deposición fundida consiste en formar piezas a partir de la deposición de material fundido en capas (Chennakesava & Narayan, 2014). La impresora que utiliza este método de fabricación se compone de una boquilla extrusora de filamento, que usualmente se desplaza por los ejes X y Y, teniendo una cama caliente que se desplaza en el eje Z. El material va depositándose uno sobre el otro formando capas, aunque para formas más complejas se extruye material que funge como soporte de las estructuras colgantes (Chennakesava & Narayan, 2014).

Los moldes diseñados con canales fueron prototipados con la técnica de deposición fundida, debido a su simpleza y tamaño de los detalles, en una impresora 3D de filamento Anycubic Chiron. Ambos moldes se imprimieron fieles al diseño, aunque se notaron unos pequeños desperfectos en el molde que incluye los canales para

el sistema de humectación. En específico, los canales tenían faltante de material (agujeros pequeños) en ciertas zonas, por lo que se procedió a rellenarlos de goma para evitar que al chorrear, el material cayera dentro de ellos.



Figura 3.49. Molde con canales para sistema neumático y de humectación impreso: con imperfectos (izquierda) y con sus agujeros rellenos de goma (derecha). Elaboración propia con la impresora de filamento Anycubic Chiron, 2022.



Figura 3.50. Moldes con canales impresos: vacíos (izquierda) y con la silicona de platino (derecha). Elaboración propia con la impresora de filamento Anycubic Chiron, 2022.

3.5.2.2 Moldes Biotexturales

Estos moldes fueron elaborados con la impresora 3D de resina Phrozen Sonic Mini 4K, la cual funciona solidificando el producto con fotopolimerización. Según mencionan Quan y colaboradores (2020), la técnica de fotocurado para impresión 3D se destaca por su alta precisión y, lo lisa que resulta la superficie de la impresión. También, se comenta que este proceso se caracteriza por una alta velocidad de impresión, sin embargo, la misma depende del tamaño de la pieza a imprimir y de la tasa de curado que varía según el movimiento del rayo láser. Los mismos autores señalan que la principal limitante de la técnica se encuentra en las propiedades del material fotocurado (ver sección 3.3.3 para más detalles del material). Los moldes biotexturados fueron impresos con esta técnica para lograr un mejor acabado del

diseño de la celda bioinspirada. Los patrones hexagonales descritos en la sección 3.1, también fueron impresos de esta misma forma.

El resultado de la impresión del molde biotextural en negativo no fue el deseado. Las estructuras de mayor tamaño sí se lograron imprimir bien, sin embargo, los filamentos no llegaron a tener la definición necesaria. Entonces, se descarta utilizar dicho molde, ya que se busca alcanzar el prototipado de la superficie texturada bioinspirada completa.



Figura 3.51. *Molde biotextural en negativo impreso. Elaboración propia con la impresora de resina Phrozen Sonic Mini 4K, 2022.*

El segundo molde se imprimió adecuadamente, formando las estructuras del diseño según lo esperado. Como se puede observar en la figura 3.52, hay cierto material residual, el cual se desprende con limpieza en alcohol isopropílico. Esta limpieza se incluye en el protocolo de preparación de moldes de resina adjunta en el apéndice 12.



Figura 3.52. *Acercamiento al molde biotextural impreso: lleno de alcohol isopropílico para posteriormente remover el material residual (izquierda) y después de remover el material residual (derecha). Elaboración propia con la impresora de resina Phrozen Sonic Mini 4K, 2022.*

Una vez que se prepara el molde de resina según lo establecido en el protocolo, es momento de chorrear la silicona de platino. Es una buena práctica explotar las burbujas que se quedan atrapadas al momento de verter el material, sin embargo, en este caso el tiempo de curado de la silicona es de 3 horas, lo cual es tiempo suficiente para que las burbujas vayan saliendo a la superficie solas.



Figura 3.53. Molde de resina preparado según el protocolo con el caucho de silicona vertido.

3.5.3 Textura Bioinspirada

Después de que pasa el tiempo de curado del caucho de silicona, es posible remover la pieza del molde. En la figura 3.54 se puede ver como resultó la pieza de silicona de platino obtenida del molde biotextural.

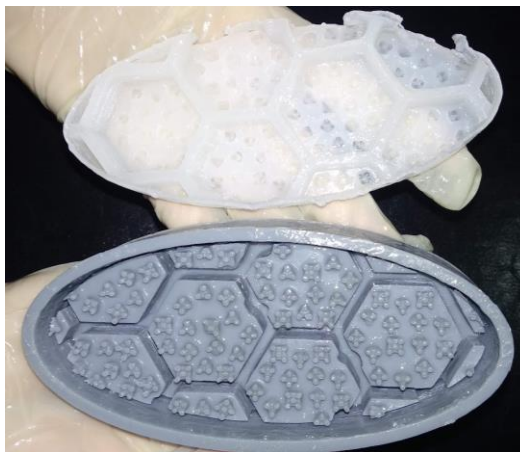


Figura 3.54. Pieza de caucho de silicona lograda con el molde biotextural.

Se decide utilizar guantes al momento de notar la presencia de partes que no habían catalizado correctamente, este inconveniente sucedió porque ciertas zonas del molde de resina debieron exponerse más a la luz ultravioleta. En la figura 3.55, se muestran los principales detalles del molde de silicona: 3.55.a) muestra que a los extremos del nuevo molde se logró conseguir la pared interior que se diseñó; 3.55.b) permite visualizar el acabado desde una vista lateral; 3.55.c) da un acercamiento con detalle del resultado de los filamentos en el molde, los cuales se plasmaron, en su mayoría, adecuadamente; 3.55.d) brinda una vista superior de la superficie.

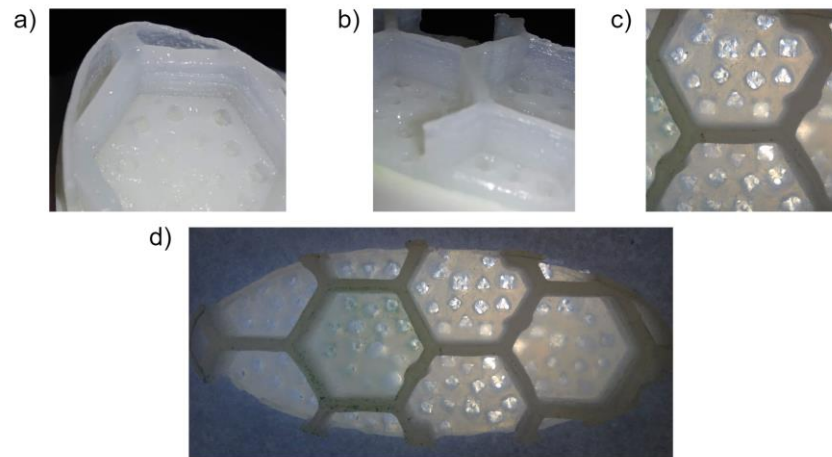


Figura 3.55. Detalles del molde de silicona biotextural: a) Pared interna en uno de los extremos; b) Vista lateral; c) Acercamiento con detalle de los filamentos; d) vista superior de la superficie.

Se consiguió un molde apto para prototipar la biotextura deseada. Se procede a cerrar el molde, creando una pared a lo largo del perímetro del molde de silicona con cinta de embalaje (ver figura 3.56), para solventar la falta de pared de algunas zonas. Adicionalmente, el molde se coloca sobre uno de los moldes que ya no se utilizan para darle un buen soporte.



Figura 3.56. Molde de silicona rodeado de cinta para embalaje.

A raíz de que se va a chorrear silicona de platino sobre un molde de silicona de platino, es necesario cubrir el molde con una capa de vaselina. Esta capa debe ser delgada, evitando que queden grumos que afecten el correcto moldeo de la pieza. Para facilitar la aplicación de la vaselina, la misma se derrite y se utiliza un pincel delgado para aplicarla sobre el molde. Luego de esto, se chorrea la silicona.



Figura 3.57. Molde de silicona rodeado de cinta para embalaje y cubierto de vaselina: sin el caucho de silicona chorreado (izquierda) y, con el fluido vertido (derecha).

Otra vez se espera el tiempo de curado para poder separar la biotextura del molde. Al remover la biotextura, la misma resulta tener una base delgada con un buen acabado de las estructuras. Algunos de los conglomerados de filamentos no fueron prototipados correctamente debido a que se dejaron grumos de vaselina, y otros del todo no se habían logrado definir en el molde de silicona por los desperfectos en el catalizado, pero el resultado general es satisfactorio. Se debe hacer la observación de que pese a que algunos filamentos se lograron plasmar muy bien, ninguno de ellos consiguió detallar la ventosa que cada uno debería tener de forma visible.

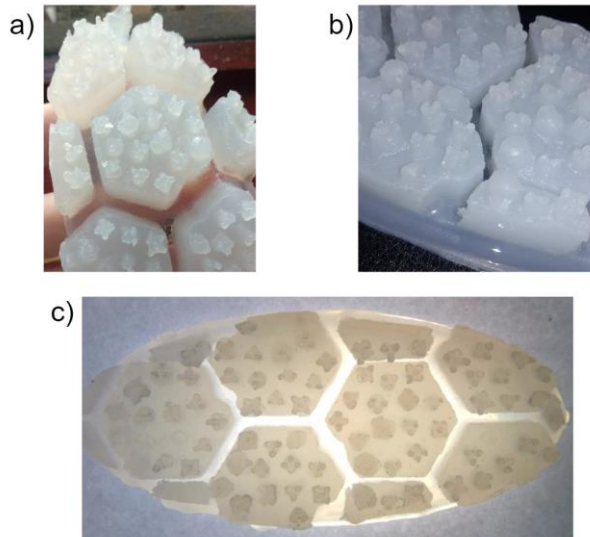


Figura 3.58. Superficie con textura bioinspirada en la *Lithobates vibicarius*: a) visualización de un extremo y el espesor de capa; b) detalle de las celdas bioinspiradas centrales; c) vista superior.

Se decide engrosar la base de la superficie texturada para darle más robustez al elemento.

3.5.4 Canales de los Sistemas Fluídicos

Las piezas obtenidas de ambos moldes resultaron detener acabados perfectos, razón por la que se continúa trabajando solo con la capa que tiene los canales para el sistema neumático y para el sistema de humectación, ya que la misma es la que se busca incorporar al prototipo final. Se considera necesario engrosar más la capa superior, para que resista la entrada de aire y se deforme según lo esperado sin estallar. El engrosamiento se logra chorreando más material sobre esta capa, esto puede hacerse con la cantidad justa distribuyéndolo con una paleta, o bordeando la capa con cinta de embalar y chorrear el material deseado.



Figura 3.59. Capa con los canales para el sistema neumático y para el sistema de humectación: vista superior a los canales (izquierda) y, vista inferior (derecha).

3.5.5 Prototipo bioinspirado

Como se mencionó en las secciones anteriores, se decidió engrosar la capa superior del elemento con canales y la capa base de la superficie texturada. Después del tiempo de curado, es posible empezar con el ensamble del prototipo. Para la conformación de los sistemas fluídicos se seleccionan los elementos mostrados en la figura 3.60.

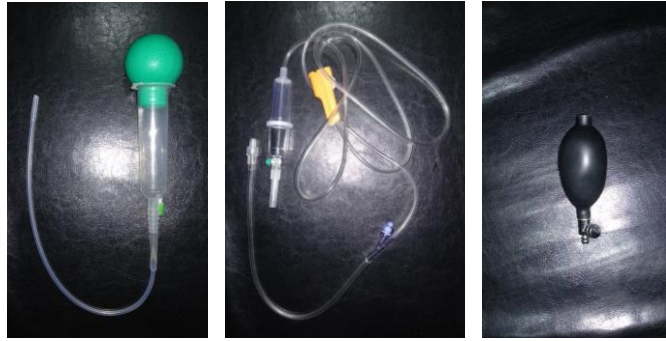


Figura 3.60. Elementos seleccionados para la conformación de los sistemas fluídicos: jeringa de bulbo con manguera para enema (izquierda), manguera médica con regulador de flujo (centro) y, perilla con válvula de alivio de un esfigmomanómetro (derecha).

Manteniendo el interés de incorporar al prototipo elementos de naturaleza blanda, se decide trabajar con mangueras suaves que a su vez son flexibles. Se utiliza una manguera médica con regulador de flujo para trasegar lo que sería la mucosa del prototipo suave, inyectado con ayuda de una jeringa. Para el sistema neumático se decide utilizar la manguera del conjunto médico para la realización de enemas, ya que su diseño, el cual le permite ajustarse a la punta de la jeringa de bulbo, es ideal para acoplarse a la perilla con válvula de un esfigmomanómetro. La incorporación de esta perilla, conocida también como bombilla, facilita la introducción de la cantidad adecuada de aire en el prototipo, y a su vez, con su válvula se convierte en la alternativa perfecta para bajar la presión dentro del mismo de manera eficiente.

El ensamble del prototipo se realiza primero pegando las mangueras a las respectivas entradas de los canales, para esto se coloca la manguera aprovechando todo el largo inicial de la entrada, se sostiene con otros elementos para mantenerla en su posición, y se le vierte silicona de platino encima. Es posible que se requiera cubrir un par de veces más para garantizar que se mantenga en la posición y no presente fugas del fluido.

Cuando ya se tienen fijadas las mangueras a la capa con los canales, se procede a pegar la capa que contiene la superficie bioinspirada. Inicialmente, se esparce material a lo largo de las paredes de los canales internos (los del sistema neumático), de manera reiterada hasta garantizar que se encuentran bien adheridos a la capa de la textura, es decir que este sellado el conducto. La primera vez se inspecciona visualmente levantando los bordes, después se coloca una cantidad pequeña adicional del caucho de silicona para reafirmar el sellado y, después de que pasa el segundo tiempo de curado, se prueba inflando con la perilla del esfigmomanómetro. La perilla permite detectar otras fugas de aire.



Figura 3.61. Revisión visual del sellado de los conductos de aire durante el ensamble del prototipo.

Una vez se tienen listos los conductos de aire, se prosigue con los conductos para la mucosa. Durante el proceso, es importante aprovechar los tiempos de curado, y de ser necesario, reforzar también el acople con las mangueras.

En la figura 3.62 se muestra el prototipo de robótica suave con superficie texturada bioinspirada en la *Lithobates vibicarius* finalizado.



Figura 3.62. Prototipo de robótica suave con superficie texturada bioinspirada en la *Lithobates vibicarius* finalizado.

3.6 Pruebas

Una vez construido el prototipo, se deben realizar las pruebas correspondientes, para validar la funcionalidad del diseño. En específico, se busca analizar la humectación de la superficie bioinspirada y, la capacidad de adherencia de esta. Adicionalmente, se introduce con pruebas para medir las capacidades del sistema neumático.

3.6.2 Sistema Neumático

Al probar el sistema neumático, se observa como el prototipo se flexiona simétricamente, manteniendo su centro recto mientras sus extremos se van

curveando. Al emplear 12 bombeos con la perilla, se alcanza un desplazamiento angular de 35° (ver figura 3.63).

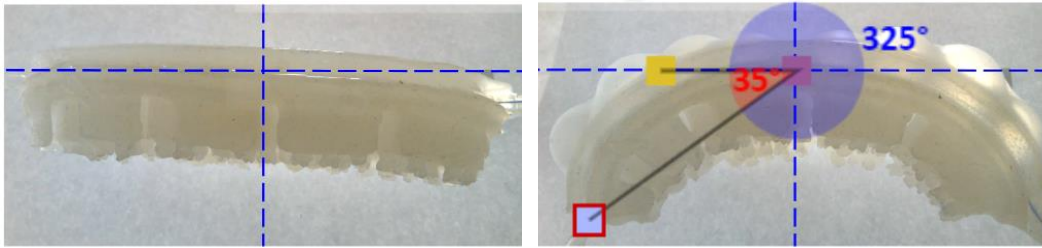


Figura 3.63. Desplazamiento angular alcanzado por el prototipo. Ángulo medido en <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/ruler/ruler.php>

Para determinar volumen de aire suministrado por bombeo, se hace la idealización de la perrilla con válvula de alivio como un elipsoide horizontal (ver figura 3.64). En la tabla 3.11 se tienen sus dimensiones medidas.

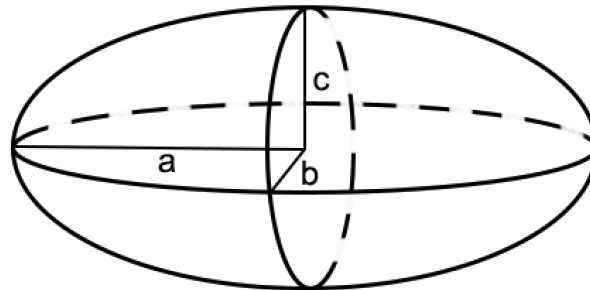


Figura 3.64. Diagrama de un elipsoide horizontal. Elaboración propia.

Tabla 3.11

Dimensiones de la perilla con válvula de alivio.

a (mm)	b (mm)	c (mm)
35	21	22

El cálculo del volumen utiliza la ecuación (2), dando como resultado un volumen de aire de $21560\pi \text{ mm}^3$ (0.0000677 m^3) por bombeo. Se tiene entonces un volumen total de $258720\pi \text{ mm}^3$ (0.00081 m^3) requerido para alcanzar un desplazamiento angular de 35°.

$$V_{\text{Elipsoide}} = \frac{4}{3}\pi abc \quad (2)$$

En simultaneo con el arqueamiento (flexión simétrica) del cuerpo, es posible observar cómo los cambios en la presión provocan una deformación celular y de membrana plasmática. Este movimiento sucede de manera similar en los palmares de los anuros, adecuando su morfología al sustrato y, a la vez, humectando la superficie para lograr la adhesión.

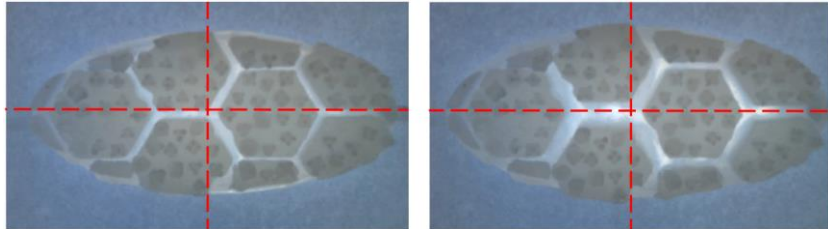


Figura 3.65. *Deformación celular y de membrana plasmática en el prototipo.*

3.6.3 Humectabilidad

Las pruebas de humectabilidad se realizan primero en los canales de los sistemas neumático y de humectación, con el propósito de obtener las velocidades de humectabilidad de ambos sistemas para su posterior comparación. Estas pruebas se realizan sobre una capa hecha del molde con canales de ambos sistemas, inyectando agua de manera constante. Se decide realizar las pruebas con este líquido ya que, los fluidos que manejan ambos sistemas según el diseño son diferentes, y, se busca unificar la prueba para comparar la humectabilidad en los diseños. Además, el agua es teñida con café para ilustrar su flujo por los canales más fácilmente, sin afectar su densidad.

Para calcular la velocidad de humectabilidad se debe obtener el tiempo de humectación y el volumen requerido. Esta prueba se realiza colocando la capa de silicona sobre una superficie plana, para posteriormente inyectarle agua mientras se graba perpendicularmente para documentar el tiempo requerido para la humectación. El líquido se inyecta con una jeringa, lo que permite conocer el volumen suministrado.

En el caso del sistema neumático, se determina que se requiere un volumen de agua de 6 mL, el cual llena los canales en 30 segundos. Se calcula entonces que su velocidad de humectabilidad es de 0.2 mL/s (0.012 L/min).

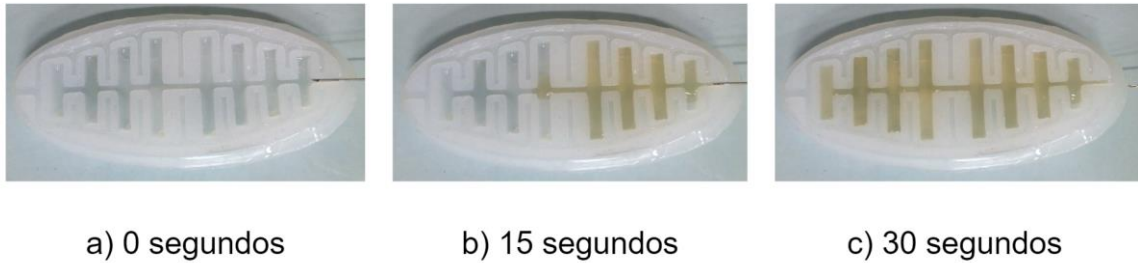


Figura 3.66. Prueba de humectabilidad de los canales del sistema neumático: a) 0 segundos; b) 15 segundos; c) 30 segundos.

Por otra parte, los canales del sistema de humectación no lograron trasegar el agua debido a la hidrofobicidad del material y la angostura del canal. Debido a lo anterior, no fue posible obtener una velocidad de humectabilidad. Manualmente, inyectando el fluido por secciones, se llenaron los canales para determinar que se requiere un volumen total de 2 mL.

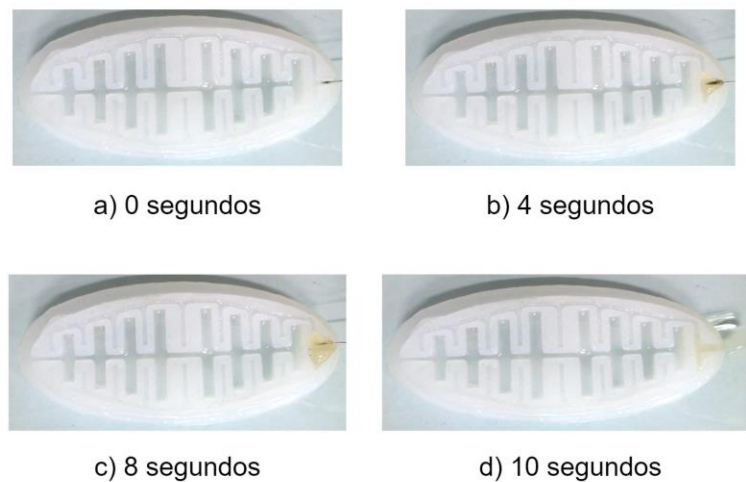


Figura 3.67. Prueba de humectabilidad de los canales del sistema de humectación: a) 0 segundos; b) 4 segundos; c) 8 segundos; d) 10 segundos.

A raíz de que el sistema de humectación diseñado no logra trasegar el fluido de manera eficaz, se procede a realizar una prueba de humectabilidad directamente en la superficie texturada. Dicha prueba se realiza en los prototipos de la biotextura impresos en resina, a la escala final seleccionada (descritos en la sección 3.1), para simular la segregación de la mucosa por medio del punto triple de la agrupación celular, manteniendo la textura en posición de movimiento normal, lo cual no puede lograrse en el prototipo, por los inconvenientes que tiene el diseño.

Entonces, para esta prueba se coloca la agrupación celular con la biotextura hacia abajo sobre una base de vidrio con cámara de alta resolución con lente vari focal y

sensor de imagen. Luego, se inyecta el líquido con la jeringa hasta humectar cada una de las células, mientras se graba para documentar el tiempo de humectación, similar a como se realizó anteriormente.

Se requirieron 8 mL para humectar la agrupación celular y un tiempo total de 11 segundos. Se obtiene entonces una velocidad de humectabilidad de 0.73 mL/s (0.0438 L/min) para cada agrupación.

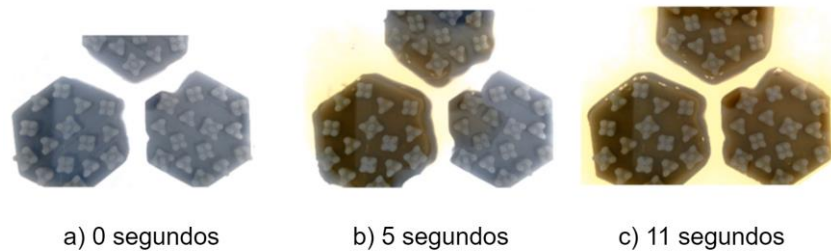


Figura 3.68. Prueba de humectabilidad de la agrupación celular: a) 0 segundos; b) 5 segundos; c) 11 segundos.

3.6.4 Adherencia

Para calcular su capacidad adhesiva es necesario primero definir el sistema de ensayo. En este caso se tiene como sujeto al prototipo con texturas bioinspiradas. El análisis se realiza con una sumatoria de fuerzas, razón por la que es necesario pesar el prototipo para conocer su masa. La masa del prototipo es 200 g (0.2 kg).

Luego, se debe humectar la superficie del prototipo y, posteriormente se coloca sobre la mitad superior de un vidrio para su observación en la cámara. Poco a poco, se varía el posicionamiento del vidrio angularmente. Después se mide el ángulo de rotación hasta que se rompa el movimiento inminente. En este caso, el ángulo resultó ser de 47°.

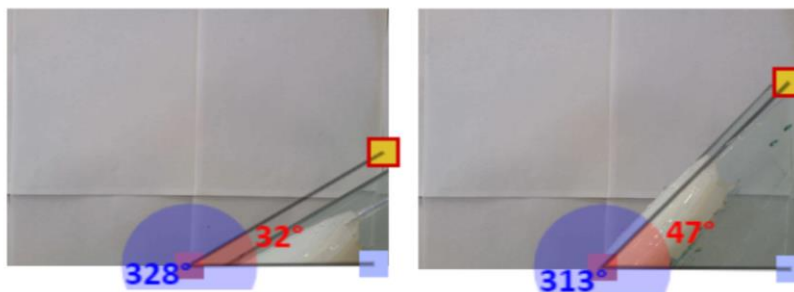


Figura 3.69. Variación del ángulo de rotación hasta alcanzar el movimiento inminente. Ángulos medidos en <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/ruler/ruler.php>

A partir de una captura del prototipo en la posición angular de deslizamiento inminente, se realiza un diagrama de cuerpo libre.

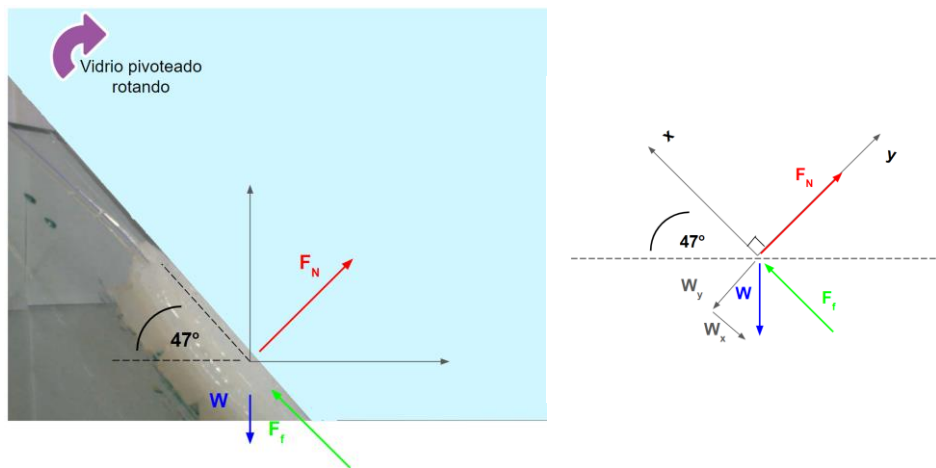


Figura 3.70. Diagrama de cuerpo libre del prototipo bioinspirado en el ángulo de deslizamiento inminente: mostrando el prototipo en el vidrio (izquierda) y, con los ejes X y Y definidos (derecha).

Las fuerzas se calculan con ayuda del diagrama de cuerpo libre y el método de sumatoria de fuerzas, acomodando los ejes a conveniencia para facilitar el análisis.

El peso (W) tiene una magnitud de 1.96 N (masa por la aceleración de la gravedad). A partir del dato anterior se obtienen los valores de los componentes X y Y del peso, 1.43 N (peso multiplicado por el seno de 47°) y 1.34 N (peso multiplicado por el coseno de 47°), respectivamente.

La fuerza normal (F_N) como se sabe es perpendicular a la superficie, actuando en este análisis como la fuerza de tensión. Al hacer la sumatoria de fuerzas en el eje Y, su magnitud resulta igual a la de la componente Y del peso, es decir, 1.34 N. Además, se tiene la fuerza cortante, en este caso la componente X del peso, fuerza que vence a la fuerza de fricción cuando sucede el movimiento inminente. Se sabe entonces que la fuerza cortante en este caso es de 1.43 N, y que la fuerza de fricción es la misma magnitud poco antes de que se dé el deslizamiento.

Con estos datos es posible obtener el coeficiente de fricción (μ), utilizando la fórmula (3), dando como resultado 1.07 (adimensional).

$$F_f = F_N \cdot \mu \quad (3)$$

Se continúa calculando el esfuerzo cortante y el esfuerzo de tensión. Ambos esfuerzos se obtienen dividiendo la respectiva fuerza entre el área efectiva de contacto. Esta área se obtiene visualizando el modelo de la superficie texturada deseada (figura 3.45) en el programa SolidWorks, ya que, pese a que la textura del prototipo no quedó exactamente igual, es la mejor aproximación. Al analizar un

filamento, se obtiene que su superficie de contacto es de aproximadamente 1.02 mm^2 . El diseño tiene 322 filamentos, lo cual equivale a 328.44 mm^2 (0.00033 m^2). Por lo tanto, se obtiene un esfuerzo cortante de 4333.33 N/m^2 (4333.33 Pa) y, un esfuerzo de tensión de 4060.61 N/m^2 (4060.61 Pa).

Al comparar el esfuerzo cortante con el de la cinta hecha con nanotubos de carbono bioinspirada en la pata del gecko, hecha por estudiantes de la Universidad de Akron (36 N/cm^2 equivalente a 360000 N/m^2) (Ge et al., 2007), el esfuerzo cortante que resiste el prototipo es aproximadamente 83 veces más pequeño. Una diferencia considerable que apunta a buscar nuevas opciones de materiales nanotexturados que den el mismo rendimiento.

También, teniendo el peso soportado equivalente a la fuerza de adhesión, se calcula la misma considerando el área de contacto, obteniendo un esfuerzo de adhesión de 5939.40 N/m^2 (5939.40 Pa). Al hacer uso de los datos obtenidos por Smith et al. (2006), se compara con la fuerza de adhesión por unidad de área de las ranas arborícolas máxima encontrada (2000 Pa), resultando en que el esfuerzo de adhesión del prototipo es casi tres veces mayor al máximo de los anuros.

Se logra apreciar el potencial de adherencia que tiene la textura bioinspirada en la *Lithobates vibicarius*, aun cuando la textura generada no se prototipó perfectamente.

3.7 Avances en robótica suave y más allá

Se considera pertinente hacer el análisis sobre el alcance que tuvo el proyecto en cuanto a generar un prototipo de robótica suave (soft robotics), con las características inicialmente definidas. Recordando el objetivo general de la investigación, se tienen cuatro pilares fundamentales del resultado esperado, los cuales se enumeran a continuación:

1. Un elemento flexible adaptable a robótica suave.
2. El cual tenga superficies texturadas inspiradas en el callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*.
3. Permita adherencia anisotrópica.
4. Tenga la capacidad de acceder a lugares de difícil acceso.

Al analizar los resultados obtenidos, es posible decir que todos enunciados anteriores fueron logrados.

En el primer caso, se diseñó y elaboró un prototipo con la capacidad de deformarse, el cual cumple con los principios de los robots suaves. Incluso, más allá de considerarlo un “elemento flexible adaptable a la robótica suave”, resulta adecuado

denominarlo un robot suave. Lo establecido anteriormente, podría verse cuestionado bajo la premisa de que los robots, para ser considerados como tal, requieren de software, componentes electrónicos y/o un cierto grado de automatización, por lo que es importante abordar dicho razonamiento.

Se debe recordar que la robótica suave busca conceptualizarse más ampliamente de lo que tradicionalmente se conoce como robótica. Los robots de naturaleza blanda se caracterizan por estar hechos de materiales suaves y flexibles, que pueden doblarse, deformarse o cambiar de forma, como respuesta a un estímulo externo o al ambiente.

El Bótsbòts klò, como se decidió llamarlo derivado de las palabras pegajoso (Bótsbòts) y pata (klò) (Krohn, 2022), provenientes de la lengua bribri, la cual se habla en algunas comunidades indígenas de Costa Rica, resulta ser semiautónomo, hecho de un material suave y flexible (caucho de silicona), que cambia su forma (infla y desinfla, logrando doblarse), como respuesta a cambios de la presión del aire, lo cual es el estímulo externo. Por eso, se puede decir que el prototipo cumple con las particularidades de un robot suave.



Figura 3.71. Bótsbòts klò sobre una lámina metálica arqueada; sin flujo de aire (izquierda) y, con aire fluyendo internamente (derecha).

Con respecto a la superficie texturada bioinspirada en el callo nupcial de la *Lithobates vibicarius*, se logró diseñar y prototipar una textura basada en las estructuras presentes en el palmar del anuro, la cual tuvo un acabado con imperfecciones, pero generalmente satisfactorio. Además, se exploraron los alcances y las limitaciones de métodos para su modelado y prototipado, llegando a desarrollar toda una metodología para la generación de prototipos biotexturados, incluyendo la preparación de moldes de resina.

De manera similar a como surgió la conceptualización de la celda bioinspirada, la bioinspiración fue parte de la formulación de los diseños del cuerpo del Bótsbòts klò, su sistema neumático y su sistema de humectación. El cuerpo y el sistema neumático resultaron acoplarse según se esperaba, logrando una capacidad motora en el robot. Por otro lado, el sistema de humectación tuvo desperfectos en su

diseño, pero con este se asentaron bases para el desarrollo de un diseño funcional para la segregación de mucosa.

En cuanto a la adherencia anisotrópica, el prototipo logró resistir hasta un esfuerzo de adhesión de 5939.40 Pa, con un esfuerzo cortante de 4333.33 Pa, y uno de tensión de 4060.61 Pa, siendo exitoso en adherirse, con su superficie texturada humectada, a un vidrio hasta un ángulo de 47°. A su vez obteniendo una velocidad de humectabilidad aproximada de 0.0438 L/min por agrupación celular. Dicha capacidad de adhesión se consiguió con imperfectos en la biotextura, lo que evidencia el potencial adhesivo de la biotextura.

Además, relacionado a su funcionalidad, se tiene su capacidad de arquearse, con un desplazamiento angular de 35° de sus extremos. Lo anterior se logra al bombear 0.00081 m³ de aire.

El diseño global del robot suave considera el acceso a lugares difíciles de llegar para el ser humano, con relieves irregulares o de riesgo, dotándolo de varias características que le otorgan versatilidad y adaptabilidad en diferentes superficies y espacios. En este caso, su flexibilidad, tamaño pequeño y ligereza aportan a su potencial de ser implementado como herramienta de los equipos de rescate en diversos escenarios de emergencia que no puedan ser alcanzados fácilmente.



Figura 3.72. *Bótsbòts klò* en: un lugar confinado con obstáculos (izquierda) y, sobre un terreno irregular elevado (derecha).

Por último, el *Bótsbòts klò* se valoró desde la perspectiva del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica. El Ing. Esteban Ramos González, quien ha trabajado en esta institución por varios años, consideró que el diseño es bueno, con un tamaño compacto que es de mucha utilidad y, con potencial de servir como herramienta en las misiones de rescate. También, fue enfático en la importancia del desplazamiento del robot y su instrumentalización, quizás con cámaras o sensores de temperatura,

para el monitoreo de zonas. Además, el ingeniero Ramos abrió la puerta a la consideración del desempeño del diseño en superficies líquidas y semilíquidas de sitios inundados, los cuales son comúnmente encontrados ante situaciones de colapsos estructurales.

En general, este proyecto derivado de un trabajo de graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica previo, titulado *Diseño sistematizado y construcción de herramental y mapas primarios de la microtextura palmar de la Lithobates vibicarius y la Agalychnis spurrelli* por la ingeniera Isabel Flores Fournier, logró aplicar el conocimiento generado en su etapa predecesora, a su vez, expandiendo la senda a nuevas posibilidades y caminos de mejora.

Capítulo 4

Conclusiones

- El proyecto resultó en la elaboración de un robot suave con una superficie texturada inspirada en la *Lithobates vibicarius*, con capacidad de arquear sus extremos 35°, adherencia anisotrópica, y características para acceder a lugares de difícil acceso. Dicho robot se nombró Bótsbòts klò utilizando las palabras pegajoso (Bótsbòts) y klò (pata) del idioma bribri.
- El Bótsbòts klò fue valorado por personal del Benemérito Cuerpo de Bomberos de Costa Rica, considerándose de buen diseño, con un tamaño compacto de utilidad y, con potencial de servir como herramienta en las misiones de rescate.
- El prototipo y su desarrollo lograron cumplir con los objetivos del trabajo de manera satisfactoria, llegando a generar más resultados de los esperados. También, concretaron buenas bases para continuar con el rediseño del presente prototipo o incorporar el conocimiento obtenido en nuevos proyectos.
- Se diseñó una celda bioinspirada y una agrupación celular, según la morfología presente en el palmar del anuro *Lithobates vibicarius*.
- Se desarrolló una metodología para la generación de prototipos biotexturados, incluyendo la preparación de moldes de resina.
- La celda bioinspirada fue observada en un microscopio electrónico de barrido, con lo cual se documentó el resultado de la impresión 3D con resina a escala micrométrica.

- Tres disoluciones de linaza a diferentes proporciones fueron caracterizadas y comparadas con la mucosa segregada por las ranas. Se llegó a la conclusión de que la disolución de linaza al 5% es la más apta para asemejar la mucosa.
- Las propiedades mecánicas y otras características relevantes de los materiales a utilizar en el diseño fueron recopiladas mediante revisión bibliográfica, siendo el principal fundamento para su selección.
- Se formularon los diseños del cuerpo del Bótsbòts klò, su sistema neumático y su sistema de humectación.
- El Bótsbòts klò logró resistir hasta un esfuerzo de adhesión de 5939.40 Pa, con un esfuerzo cortante de 4333.33 Pa, y uno de tensión de 4060.61 Pa. Su diseño le permite adherirse, con su superficie texturada humectada, a un vidrio hasta un ángulo de 47°.
- Se aprovechó el conocimiento derivado de la tesis *Diseño sistematizado y construcción de herramental y mapas primarios de la microtextura palmar de la Lithobates vibicarius y la Agalychnis spurrelli*, desarrollada por la ingeniera mecánica Isabel Flores Fournier.

Recomendaciones

- La revisión bibliográfica y el asesoramiento de expertos es fundamental para el planteamiento de la investigación, el establecimiento de metas, la anticipación de la mayoría de inconvenientes, su posterior desarrollo y, una conclusión exitosa de la misma.
- Al preparar las muestras para su visualización en el microscopio siempre es recomendable darles la debida limpieza. En el caso de las fotografías tomadas de la celda bioinspirada impresa en resina fue posible observar fibras ajenas al material de impresión, las cuales se hubieran removido si antes de cubrir la muestra con oro se realizaba una limpieza ultrasónica.
- Al preparar disoluciones con linaza es importante considerar que la calidad del mucilago varia sus propiedades resultantes, por lo que cada disolución será diferente.
- Cuando se realicen mediciones del ángulo de contacto en una superficie cubierta con plasma, es necesario hacerlas ágilmente, ya que, si se tarda mucho tomando las fotografías, con el tiempo se irá perdiendo el efecto hidrofílico que este recubrimiento genera. En caso de notar que las mediciones van aumentando en magnitud, es mejor volver a cubrir la superficie.
- Este trabajo utilizó la silicona de platino Ecoflex 00-50 para el prototipo final, dicho producto fue comprado en amazon.com, enviado desde Estados Unidos debido a que en el momento consultado no estaba disponible en el mercado costarricense. A raíz de lo anterior, se recomienda buscar posibles productos en el mercado nacional que cumplan con las propiedades necesarias para el diseño, con el fin de facilitar su obtención y abaratar costos.

- En el diseño del molde con canales, es recomendable ensanchar los canales del sistema humectante y recubrirlos con carbón para solventar la hidrofobicidad del material, para que así el fluido fluya más fácilmente. Paralelamente, se podrían reducir los canales del sistema neumático para requerir un menor volumen de aire para el funcionamiento.
- Para la preparación de los moldes de resina, se recomienda aumentar la exposición a la luz ultravioleta, considerando lo complejo de su diseño, para evitar inconvenientes con el catalizado de la silicona.
- Al utilizar un molde de caucho de silicona, se sugiere ser cuidadoso con la aplicación de vaselina, evitando dejar grumos para mejorar el prototipado de la biotextura.
- Se debe tener el cuidado durante el chorreado de material, de generar espesores de capa no muy delgados, ya que los mismos se pueden estallar al introducir mucho aire por los canales, por esto es necesario que el grosor de la capa resista la cantidad de aire necesaria para lograr el movimiento.
- Con respecto a los sistemas fluídicos en general, una oportunidad de mejora es automatizar su funcionamiento, y también, considerar una sincronización entre ambos sistemas.
- Pensando en su potencial de apoyar en misiones de rescate, se recomienda su instrumentalización en diseños futuros.
- Se sugiere disminuir el tamaño general del prototipo, con el fin de obtener un elemento más liviano y compacto, y así paralelamente optimizar su adherencia.

Referencias bibliográficas

- Abdi, H., & Williams, L.J. (2010). Tukey's honestly significant difference (HSD) test. *Encyclopedia of research design*, 3(1), 1-5.
- Acosta-Chaves, V.J., Madrigal-Elizondo, V., Chaves, G., Morera-Chacón, B., García-Rodríguez, A. & Bolaños, F. (2019). Shifts in the diversity of an amphibian community from a premontane forest of San Ramón, Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 67(2), 259-273.
- Agüero, A., Morcillo, M.D.C., Quiles-Carrillo, L., Balart, R., Boronat, T., Lascano, D., Torres-Giner, S., & Fenollar, O. (2019). Study of the Influence of the Reprocessing Cycles on the Final Properties of Polylactide Pieces Obtained by Injection Molding. *Polymers* 2019, 11(12). doi: 10.3390/polym11121908
- Arrieta, P.M., Samper, D.M., Aldas, M., & López, J. (2017). On the use of PLA-PHB Blends for Sustainable Food Packaging Applications. *Materials* 2017, 10(9). doi: 10.3390/ma10091008
- Autumn, K., Liang, Y.A., Hsieh, S.T., Zesch, W., Chan, W.P., Kenny, T.W., Fearing, R. & Full, R.J. (2000). Adhesive Force of a Single Gecko Foot-Hair. *Nature*, 405, 681-685.
- Barnes, W.J., Perez-Goodwyn, P.J., Nokhbatolfoghahai, M., & Gorb, S.N. (2011). Elastic modulus of tree frog adhesive toe pads. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 197(10), 969-970. doi: 10.1007/s00359-011-0658-1
- Becerra-Ramirez, E. (2017). *Optimización del secado por aspersion del mucílago de linaza (Linum usitatissimum L.) y evaluación de sus propiedades reológicas* (Tesis de grado). Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú.
- Beltrán, F.R., Arrieta, M.P., Moreno, E., Gaspar, G., Muneta, L.M., Carrasco-Gallego, R., Yáñez, S., Hidalgo-Carvajal, D., de la Orden, M.U., & Martínez-Urreaga, J. (2021). Evaluation of the technical viability of

- distributed mechanical recycling of PLA 3D printing wastes. *Polymers*, 13(8), 1247. doi: 10.3390/polym13081247
- Bern, J.M, Banzet, P., Poranne, R., & Coros, S. (2019). Trajectory optimization for a cable-driven soft robot locomotion. *Robotics: Science and Systems*, 1(3).
- Bhushan, B. (2017). *Springer Handbook of Nanotechnology*, 4ta ed., Springer International, Cham, Switzerland. doi: 10.1007/978-3-662-54357-3
- Bourell, D.L. (2016). Perspectives on Additive Manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46, 1-18. doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-031606
- Cedeño-González, F.O., Prieto-González, M.M., Bada-Gancedo, J.C., & Alonso-Suárez, R. (1999). Estudio de la densidad y de la viscosidad de algunos ácidos grasos puros. *Grasas y aceites*, 50(5), 359-368. doi: 10.3989/gya.1999.v50.i5.680
- Cerpa-Gallegos, M.A., Figeroa-Flores, D.M., López-Salgado, A.M., García-López, J.A., Campos-Aguado, S.I., & del Río-Gama, M. (2014). Determinación de ángulo de contacto en sistemas puros y composites. En 1er. Simposio Nacional de Investigación e Innovación en Ingeniería Química (p. 84-85).
- Chennakesava, P. & Narayan, Y.S. (2014). Fused deposition modeling-insights. En Proceedings of the international conference on advances in design and manufacturing ICAD&M, 14, 1345.
- Cianchetti, M., Calisti, M., Margheri, L., Kuba, M., & Laschi, C. (2015). Bioinspired locomotion and grasping in water: the soft eight-arm OCTOPUS robot. *Bioinspiration & Biomimetics*, 10(3), 035003. doi: 10.1088/1748-3190/10/3/035003
- Cifuentes, M., & Nicolás, J. (2016). *Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada* (Tesis de Posgrado). Universidad de Chile, Chile.

- Cook, A. (1987). Functional aspects of the mucus-producing glands of the Systellommatophoran slug, *Veronicella floridana*. *Journal of Zoology*, 211(2), 291–305. doi: 10.1111/j.1469-7998.1987.tb01535.x
- Dagnino, J. (2014). Análisis de varianza. *Revista chilena de anestesia*, 43(4), 306-310.
- De Jesus, R.C., Balestro, A., Corral, R., Dellallibera, A., & De Mello, D. R. (2011). *Desempeño de compuestos de caucho de silicona HTV en ensayos de encaminamiento eléctrico y erosión en corriente alternada y en corriente continua*. Conferencia: Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ - XIV ERIAC. doi: 10.13140/RG.2.1.1797.1282
- Duellman, W.E., & Trueb, L. (1994). *Biology of amphibians*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Endlein, T., & Barnes, W.J.P. (2015). Wet Adhesion in Tree and Torrent Frogs. *Encyclopedia of Nanotechnology*, 1–20. doi:10.1007/978-94-007-6178-0_257-2
- Endlein, T., Ji, A., Yuan, S., Hill, I., Wang, H., Barnes, W.J.P., Dai, Z., & Sitti, M. (2017). The use of clamping grips and friction pads by tree frogs for climbing curved surfaces. *Royal Society*, 284(1849). doi: 10.1098/rspb.2016.2867
- Federle, W., Barnes, W.J.P., Baumgartner, W., Drechsler, P., & Smith, J.M. (2006). Wet but not slippery: boundary friction in tree frog adhesive toe pads. *Journal of The Royal Society Interface*, 3(10), 689–697. doi: 10.1098/rsif.2006.0135
- Feng, X., Yang, Z., Rostom, S.S.H., Dadmun, M., Wang, S., Wang, Q., & Xie, Y. (2018). Reinforcing 3D printed acrylonitrile butadiene styrene by impregnation of methacrylate resin and cellulose nanocrystal mixture: Structural effects and homogeneous properties. *Materials & Design*, 138, 62-70. doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.050
- Figuerola, F., Muñoz, O., & Estévez, A.M. (2008). La linaza como fuente de compuestos bioactivos para la elaboración de alimentos. *Agro sur*, 36(2), 49-58. doi: 10.4206/agrosur.2008.v36n2-01

- Flores-Fournier, M.I. (2020). *Diseño sistematizado y construcción de herramental y mapas primarios de la microtextura palmar de la Lithobates vibicarius y la Agalychnis spurrelli* (Tesis de posgrado). Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Flores-Hernández, F.J., & Martínez-Coronel, M. (2014). Amplexo interespecífico entre *Ecnomiohyla miotympanum* (Anura: Hylidae) y *Rhinella marina* (Anura: Bufonidae) en el estado de Hidalgo, México. *Acta Zoológica Mexicana*, 30(2): 395-398.
- Ge, L., Sethi, S., Ci, L., Ajayan, P.M., & Dhinojwala, A. (2007). Carbon nanotube-based synthetic gecko tapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(26), 10792–10795. doi: 10.1073/pnas.0703505104
- Gómez-Arias, E., Andaverde, J., Santoyo, E., & Urquiza, G. (2009). Determinación de la viscosidad y su incertidumbre en fluidos de perforación usados en la construcción de pozos geotérmicos: aplicación en el campo de Los Humeros, Puebla, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26(2), 516-529.
- González, H.Á. & Mesa, D.H. (2004). La importancia del método en la selección de materiales. *Scientia et Technica*, 10(24), 175-180.
- Gul, J.Z., Sajid, M., Rehman, M.M., Siddiqui, G.U., Shah, I., Kim, K.H., Lee, J.W., Choi, K.H. (2018). 3D printing for soft robotics – a review. *Science and Technology of Advanced Materials*, 19(1), 243–262. doi: 10.1080/14686996.2018.1431862
- Gulati, H., Vaishya, S., & Veeramachaneni, S. (2011). *Bluetooth and Wi-Fi controlled rescue robots*. 2011 Annual IEEE India Conference. doi: 10.1109/indcon.2011.6139500
- Hall, C., Tulbek, M.C., & Xu, Y. (2006). Flaxseed. *Advances in Food and Nutrition Research*, 1–97. doi: 10.1016/s1043-4526(06)51001-0
- Henke, E.-F.M., Schlatter, S., & Anderson, I.A. (2017). Soft Dielectric Elastomer Oscillators Driving Bioinspired Robots. *Soft Robotics*, 4(4), 353–366. doi: 10.1089/soro.2017.0022

- Ilievski, F., Mazzeo, A.D., Shepherd, R.F., Chen, X., & Whitesides, G.M. (2011). Soft Robotics for Chemists. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(8), 1890–1895. doi: 10.1002/anie.201006464
- IUCN SSC Amphibian Specialist Group. (2020). *Lithobates vibicarius*. The IUCN Red List of Threatened Species 2020: e.T58746A54352894. doi: 10.2305/IUCN.UK.2020-3.RLTS.T58746A54352894.en
- Jensen, E. (2013, August 07). Drawing nanometer components. [Publicación de Foro En Línea]. SOLIDWORKS User Forum. <https://forum.solidworks.com/thread/70831>
- Jiménez, R.R., Alvarado, G., Estrella, J. and Sommer, S. (2019). Moving Beyond the Host: Unraveling the Skin Microbiome of Endangered Costa Rican Amphibians. *Frontiers in Microbiology*, 10(2060). doi: 10.3389/fmicb.2019.02060
- Jiménez-Quirós, R. (2016, 26 de Abril). Amphibian Skin Microbiome and its Interaction with Batrachochytrium dendrobatidis: Tools to Mitigate Chytridiomycosis in Costa Rica. *The Rufford Foundation*. (G. Alvarado, Productor). Recuperado el 14 de Septiembre, 2021 de The Rufford: https://www.rufford.org/projects/randall_jimenez_quiros
- Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology*, 31(5), 287–294. doi: 10.1016/j.tibtech.2013.03.002
- Krohn, H.S. (2022). Diccionario bribri–español español–bribri. Recuperado de <http://www.haakonkrohn.com/bribri>
- Langowski, J.K.A., Dodou, D., Kamperman, M., & Van Leeuwen, J.L. (2018). Tree frog attachment: mechanisms, challenges, and perspectives. *Front. Zool.* 2018, 15–32. doi: 10.1186/s12983-018-0273-x
- Li, Y., Krahn, J., & Menon, C. (2016). Bioinspired Dry Adhesive Materials and Their Application in Robotics: A Review. *Journal of Bionic Engineering*, 13(2), 181–199. doi: 10.1016/s1672-6529(16)60293-7
- Madou, M.J. (2011). Fundamentals of Microfabrication and Technology: Manufacturing Techniques for Microfabrication and Nanotechnology, 3era ed., vol. 2. Boca Raton: CRC Press.

- Majidi, C. (2018). Soft-Matter Engineering for Soft Robotics. *Advanced Materials Technologies*. doi: 10.1002/admt.201800477
- Manti, M., Hassan, T., Passetti, G., D'Elia, N., Laschi, C., & Cianchetti, M. (2015). A Bioinspired Soft Robotic Gripper for Adaptable and Effective Grasping. *Soft Robotics*, 2(3), 107–116. doi: 10.1089/soro.2015.0009
- Meng, F., Liu, Q., Wang, X., Tan, D., Xue, L., & Barnes, W.J.P. (2019). Tree frog adhesion biomimetics: opportunities for the development of new, smart adhesives that adhere under wet conditions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2150), 20190131. doi: 10.1098/rsta.2019.0131
- Miranda-Fernandes, J.F. (2018). Study of the influence of 3D printing parameters on the mechanical properties of PLA. Universidad de Lisboa. Recuperado de https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113703682/Extended%20Abstract_73521.pdf
- Mirvakili, S.M., Leroy, A., Sim, D., & Wang, E.N. (2021). Solar-Driven Soft Robots. *Advanced Science*, 8(8). doi: 10.1002/advs.202004235
- Morera-Chacón, B.H. & Sánchez-Porras, R. (2015). Anfibios y reptiles de la Reserva Biológica Alberto Manuel Brenes. *Revista Pensamiento Actual*, 15(25): 39-59.
- Moro, S. (2015, 29 de Noviembre). *Anatomía-fisiología de anuros: ranas*. Paradis Sphynx. Obtenido el 22 de Septiembre, 2021 de: <https://anfibios.paradai-sphynx.com/informacion/anatomia-fisiologia-rana.htm>
- Nachtigall, W. (1974). Biological mechanisms of attachment. Berlin, Germany: Springer.
- Ortiz, L.A., Escudero, R., & Rao, F. (2022). El ángulo de contacto y su relación con las propiedades superficiales en un sistema orgánico-líquido-gas. *Afinidad*, 79(595), 224-230.

- Ortiz-Domínguez, M., & Cruz-Avilés, A. (2022). Viscosidad de un fluido. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 9(17), 77-84. doi: 10.29057/escs.v9i17.7893
- Pazhamannil, R.V., Rajeev, A., Govindan, P., & Edacherian, A. (2022). Experimental Investigations into the Effects of Process Parameters and UV Curing on the Tensile Strength of Projection Based Stereolithography. *Strength of Materials*, 54(3), 483-492.
- Pedrós, R. (2013). Demo 59. Densidad y viscosidad. Universidad de Valencia. Recuperado de <https://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/32384/demo59.pdf?sequence=1>
- Pérez-Trejo, L., Méndez-Sánchez, A.F., & Paniagua-Mercado, A. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 36.
- Phrozen. (s.f.). Phrozen Aqua 4K 3D Printing Resin. Recuperado el 24 de Febrero del 2022 de: <https://phrozen3d.com/products/aqua-gray-4k-resin-phrozen?variant=40374317908155>
- Quan, H., Zhang, T., Xu, H., Luo, S., Nie, J., & Zhu, X. (2020). Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioactive Materials*, 5(1), 110–115. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.0
- Rieffel, J. & Trimmer, B. (2010). Body/Brain Co-Evolution in Soft Robots. En *ALIFE* (pp. 257-260).
- Rodríguez-García-Cebadera, Á. (2010). Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales (Tesis de Posgrado). Universidad Carlos III de Madrid, España.
- Romero-García, E. (2019). Evaluación del ángulo de contacto en formulaciones adhesivas a base de lignina despolimerizada sobre madera (Tesis de Posgrado). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

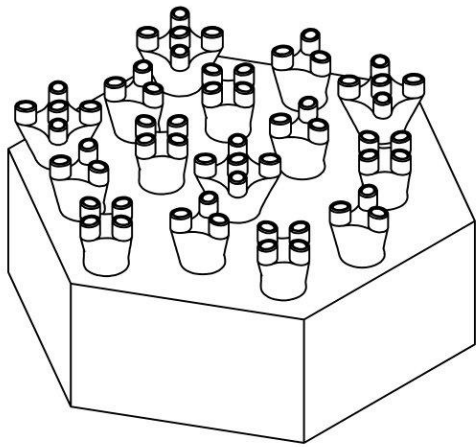
- Rosero, R.H.L. (2019). *Reconocimiento de humanos en imágenes de búsqueda y rescate con UAV usando una interfaz de realidad mixta* (Disertación Doctoral). Instituto Politécnico de Leiria, Leiria.
- Saha, D. & Bhattacharya, S. (2010). Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review. *J. Food Sci. Technol*, 47, 587-597.
- Sareh, S., Althoefer, K., Li, M., Noh, Y., Tramacere, F., Sareh, P., Mazzolai, B., & Kovac, M. (2017). Anchoring like octopus: biologically inspired soft artificial sucker. *Journal of The Royal Society Interface*, 14(135), 1-9. doi: 10.1098/rsif.2017.0395
- Savage, J.M. (2002). *The Amphibians and Reptiles of Costa Rica: A Herpetofauna between two Continents, between two Seas*. University of Chicago Press, Chicago.
- Shepherd, R.F., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S.A., Stokes, A.A., Mazzeo, A.D., Chen, X., Wang, M., & Whitesides, G.M. (2011). Multigait soft robot. *Proceedings of the national academy of sciences (PNAS)*, 108(51), 20400-20403. doi: 10.1073/pnas.1116564108
- Smith, J.M., Barnes, W.J.P, Downie, J.R. & Ruxton, G.D. (2006). Adhesion and allometry from metamorphosis to maturation in hylid tree frogs: a sticky problem. *Journal of Zoology*, 270(2006), 372–383. doi: 10.1111/j.1469-7998.2006.00145.x
- Stamm, M. (2008). *Polymer Surfaces and Surfaces*. Springer, Germany.
- Sun, J. & Bhushan, B. (2019). Nanomanufacturing of bioinspired surfaces. *Tribology International*, 129, 67–74. doi: 10.1016/j.triboint.2018.08.007
- Sung, Y.H., Lee, W.H., Ng, H.N., Crump, M.L., & Karraker, N.E. (2021). Novel reproductive behavior in an Asian frog: sex-reversed inguinal amplexus. *Ecosphere*, 12(3). doi: 10.1002/ecs2.3407
- Tapia-Rodríguez, D.M. (2022). *Caucho de silicona*. Biblioteca Universidad EIA. Recuperado el 01 de Septiembre, 2022 de: <https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/4485/20.%20David%20Tapia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Toledo R. & Jared C. (1995). Cutaneous granular glands and amphibian venoms. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 111A(1), 1-129.
- Torres-González, M.A. (2020). Determinación del índice de cetano aproximado, la viscosidad cinemática y las propiedades reológicas del biodiesel a nivel laboratorio [Tesis]. Universidad de las Américas Puebla.
- Toscano-Moreno, M., Mandow, A., Alcázar-Martínez, M., & García-Cerezo, A. (2018). *Planificador estratégico para operaciones de rescate mediante vehículos terrestres no tripulados*. En XXXIX Jornadas de Automática (pp. 387-393). Área de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad de Extremadura. doi: 10.17979/spudc.9788497497565.0387
- Tramacere, F., Follador, M., Pugno, N.M., & Mazzolai, B. (2015). Octopus-like suction cups: from natural to artificial solutions. *Bioinspiration & Biomimetics*, 10(3). doi: 10.1088/1748-3190/10/3/035004
- Tümer, E.H. & Erbil, H.Y. (2021). Extrusion-based 3d printing applications of pla composites: A review. *Coatings*, 11(4), 390.
- Wainwright, M. & Gray, A. (2009). Conservation of the Critically Endangered Green-eyed Frog *Lithobates vibicarius*. Recuperado el 17 de Octubre del 2021 de: <https://frogblogmanchester.files.wordpress.com/2009/05/lithobates-vibicarius-project-report.pdf>
- Wittbrodt, B. & Pearce, J.M. (2015). The Effects of PLA Color on Material Properties of 3-D Printed Components. *Additive Manufacturing*, 8, 110-116.
- Xia, Y. & Whitesides, G.M. (1998). Soft Lithography. *Angewandte Chemie International Edition*, 37(5), 550–575. doi: 10.1002/(sici)1521-3773(19980316)37:5<550::aid-anie550>3.0.co;2-g
- Xue, L., Sanz, B., Luo, A., Turner, K.T., Wang, X., Tan, D., Zhang, R., Du, H., Steinhart, M., Mijangos, C., Guttman, M., Kappl, M., del Campo, A. (2017). Hybrid Surface Patterns Mimicking the Design Adhesive Toe Pad of Tree Frog. *ACS NANO*, 11(10), 9711-9719. doi: 10.1021/acsnano.7b04994

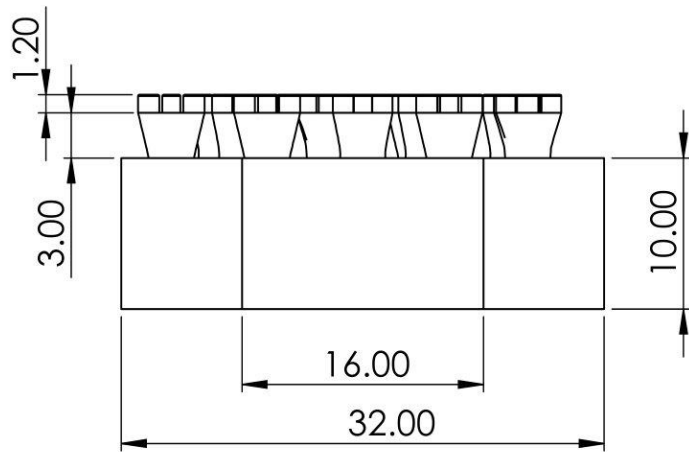
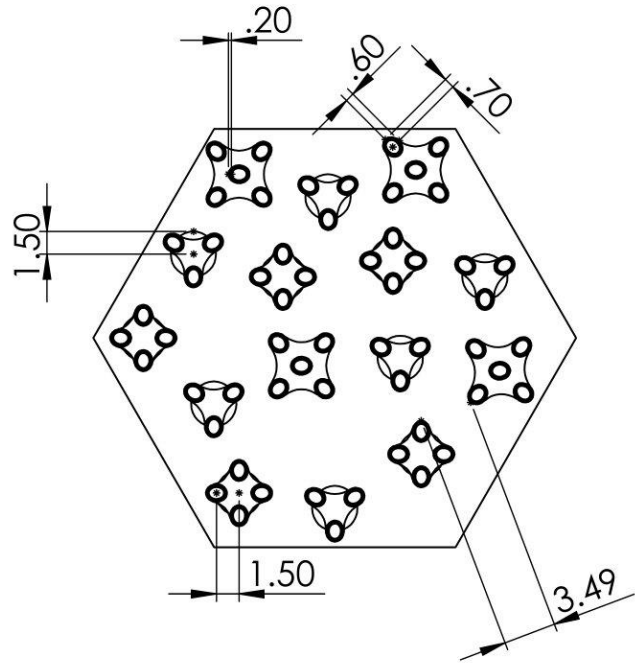
Yap, Y.L., Sing, S.L., & Yeong, W.Y. (2020). A review of 3D printing processes and materials for soft robotics. *Rapid Prototyping Journal*. doi: 10.1108/rpj-11-2019-0302

Apéndices

Apéndice 1.
Celda bioinspirada.

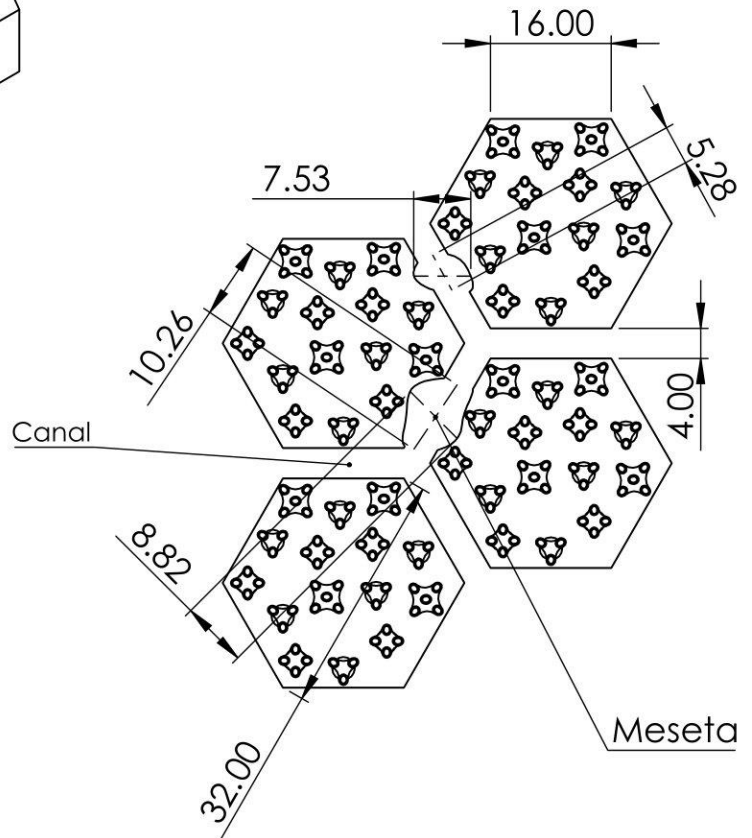
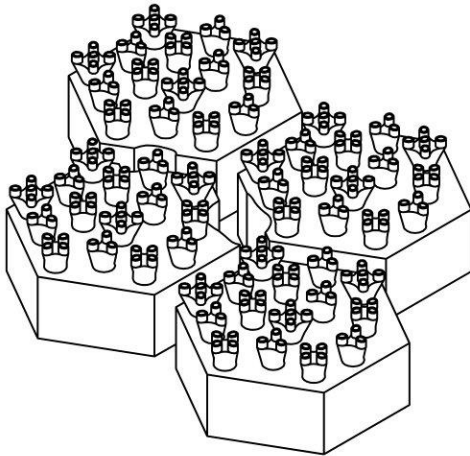


Conglomerados de filamentos distribuidos al azar con separaciones mínimas de 3 mm entre conglomerados

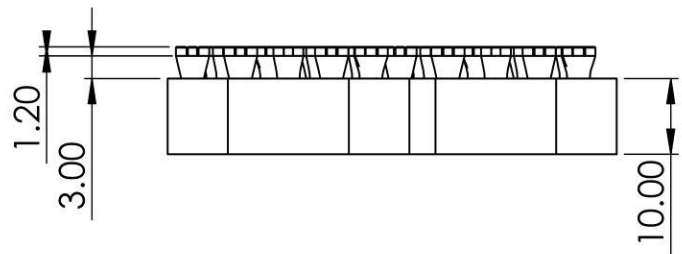


Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica Trabajo Final de Graduación	Nombre: María Fernanda Abarca Jiménez	Celda Bioinspirada	Carta
	Carné: B50013		

Apéndice 2.
Agrupación celular.



Mesetas elípticas
irregulares colocadas al
azar

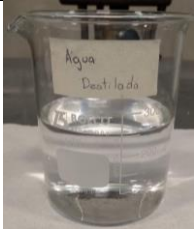






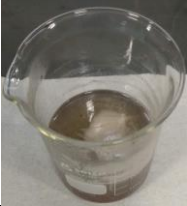

Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica Trabajo Final de Graduación	Nombre: María Fernanda Abarca Jiménez	Agrupación Celular	Carta
	Carné: B50013		

Apéndice 3.

Protocolo de preparación de disoluciones de linaza.

PROTOCOLO DE PREPARACIÓN DISOLUCIONES DE LINAZA		CÓDIGO: N/A	
		FECHA DE REVISIÓN: 02 de Noviembre, 2022	
DESCRIPCIÓN GENERAL			
<p>En este protocolo se establece el procedimiento que se lleva a cabo para preparar disoluciones de linaza con distintas proporciones de la semilla en agua destilada, para obtener variaciones en sus propiedades mecánicas.</p>			
#	HERRAMENTAL/MATERIALES	OBSERVACIONES	
1	Linaza	Si no se tiene colador, se puede decantar, sin embargo, se recomienda el uso del colador para obtener un volumen mayor del fluido.	
2	Agua Destilada		
3	Beakers		
4	Estufa		
5	Balanza		
6	Colador		
7	Termómetro		
8	Guantes protectores de calor		
9	Envases		
10	Etiquetas		
PROCESO			
<i>Preparación de la disolución</i>			
No	PASO	REFERENCIAS FOTOGRAFICAS	OBSERVACIONES

1	Medir 250 mL de agua destilada.		-
2	Tara el recipiente que contendrá la linaza.		-
3	Pesar la cantidad de linaza buscada para la disolución.		-
4	Llevar a ebullición el agua destilada.		En este caso la temperatura fue de 95 °C.
5	Añadir la linaza.		-
6	Dejar por 20 minutos a esa temperatura.	-	No dejar la disolución más de este periodo porque la linaza se irá quemando.

7	Apartar de la fuente de calor.		-
8	Decantar o colar, preferiblemente mientras siga tibia, para obtener una mayor cantidad de muestra y etiquetar.		Se sugiere utilizar un recipiente con tapa y etiquetarlo según corresponda.

Tratamiento de datos:

Almacenar las disoluciones en el refrigerador para ralentizar el proceso de descomposición. Realizar las pruebas con las disoluciones a temperatura ambiente.

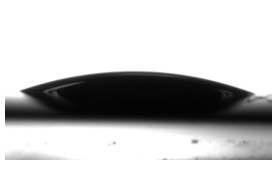



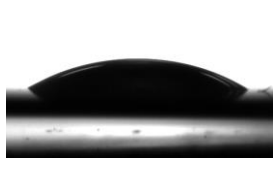







Apéndice 4.

Capturas de los ensayos de mojabilidad en acero 304 limpio.

Ensayos de mojabilidad realizados en Acero 304 limpio			
Fluido	1	2	3
AA H2O			
AA Lin12.5			
AA Lin18			
AA Lin25			

Apéndice 5.

Capturas de los ensayos de mojabilidad en acero 304 limpio y cubierto con plasma.

Ensayos de mojabilidad realizados en Acero 304 limpio y cubierto con plasma			
Fluido	1	2	3
AP H2O			
AP Lin12.5			
AP Lin18			
AP Lin25			

Apéndice 6.

Resultados del análisis de varianza y la prueba Tukey de los ángulos de contacto de los fluidos sobre la superficie de acero 304 limpia.

Summary of Data						
	Treatments					
	1	2	3	4	5	Total
N	6	6	6	6		24
$\sum X$	389.76	413.384	447.139	369.129		1619.412
Mean	64.96	68.8973	74.5232	61.5215		67.476
$\sum X^2$	25322.4302	28490.8515	33328.5621	22744.3079		109886.1518
Std.Dev.	0.851	1.3997	1.1268	2.6434		5.1732

Result Details				
Source	SS	df	MS	
Between-treatments	560.8144	3	186.9381	$F = 68.34666$
Within-treatments	54.7029	20	2.7351	
Total	615.5174	23		

The F -ratio value is 68.34666. The p -value is $< .00001$. The result is significant at $p < .05$.

Prueba Tukey

<i>Pairwise Comparisons</i>		HSD _{.05} = 2.6725 HSD _{.01} = 3.3880	Q _{.05} = 3.9583 Q _{.01} = 5.0180
T ₁ :T ₂	M ₁ = 64.96 M ₂ = 68.90	3.94	Q = 5.83 (p = .00273)
T ₁ :T ₃	M ₁ = 64.96 M ₃ = 74.52	9.56	Q = 14.16 (p = .00000)
T ₁ :T ₄	M ₁ = 64.96 M ₄ = 61.52	3.44	Q = 5.09 (p = .00889)
T ₂ :T ₃	M ₂ = 68.90 M ₃ = 74.52	5.63	Q = 8.33 (p = .00005)
T ₂ :T ₄	M ₂ = 68.90 M ₄ = 61.52	7.38	Q = 10.92 (p = .00000)
T ₃ :T ₄	M ₃ = 74.52 M ₄ = 61.52	13.00	Q = 19.26 (p = .00000)

Nota: Los resultados fueron obtenidos a un 95% de confianza con la herramienta disponible de manera gratuita en el sitio web: <https://www.socscistatistics.com/tests/anova/default2.aspx>

Apéndice 7.

Resultados del análisis de varianza y la prueba Tukey de los ángulos de contacto de los fluidos sobre la superficie de acero 304 limpia y cubierta con plasma.

Summary of Data						
	<i>Treatments</i>					
	1	2	3	4	5	Total
N	6	6	6	6		24
ΣX	131.584	157.557	146.978	247.229		683.348
Mean	21.9307	26.2595	24.4963	41.2048		28.473
ΣX^2	2891.2295	4138.5334	3601.3346	10190.2213		20821.3188
Std.Dev.	1.0492	0.4828	0.4272	0.7989		7.7022

Result Details				
<i>Source</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	
Between-treatments	1353.691	3	451.2303	<i>F</i> = 837.62007
Within-treatments	10.7741	20	0.5387	
Total	1364.4651	23		

The *F*-ratio value is 837.62007. The *p*-value is < .00001. The result is significant at *p* < .05.

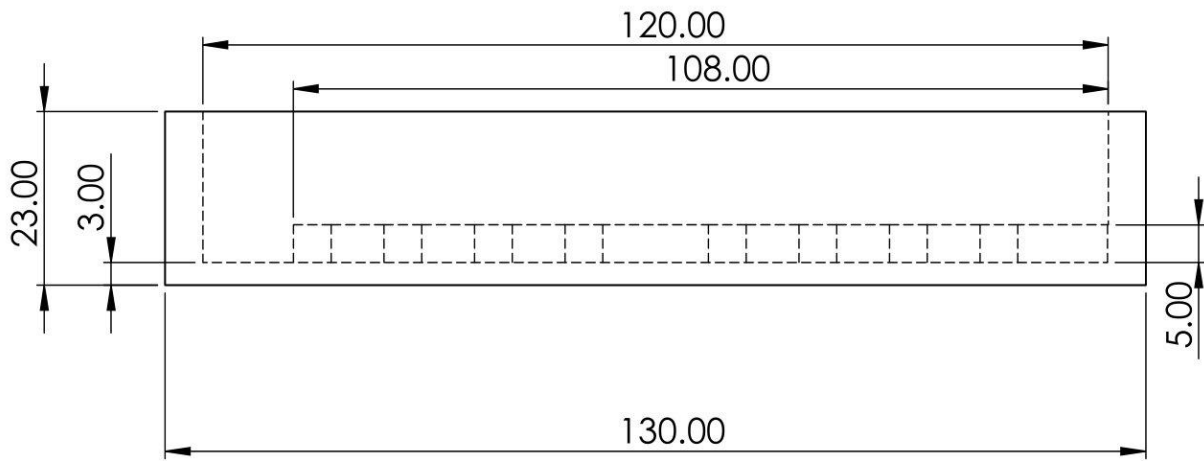
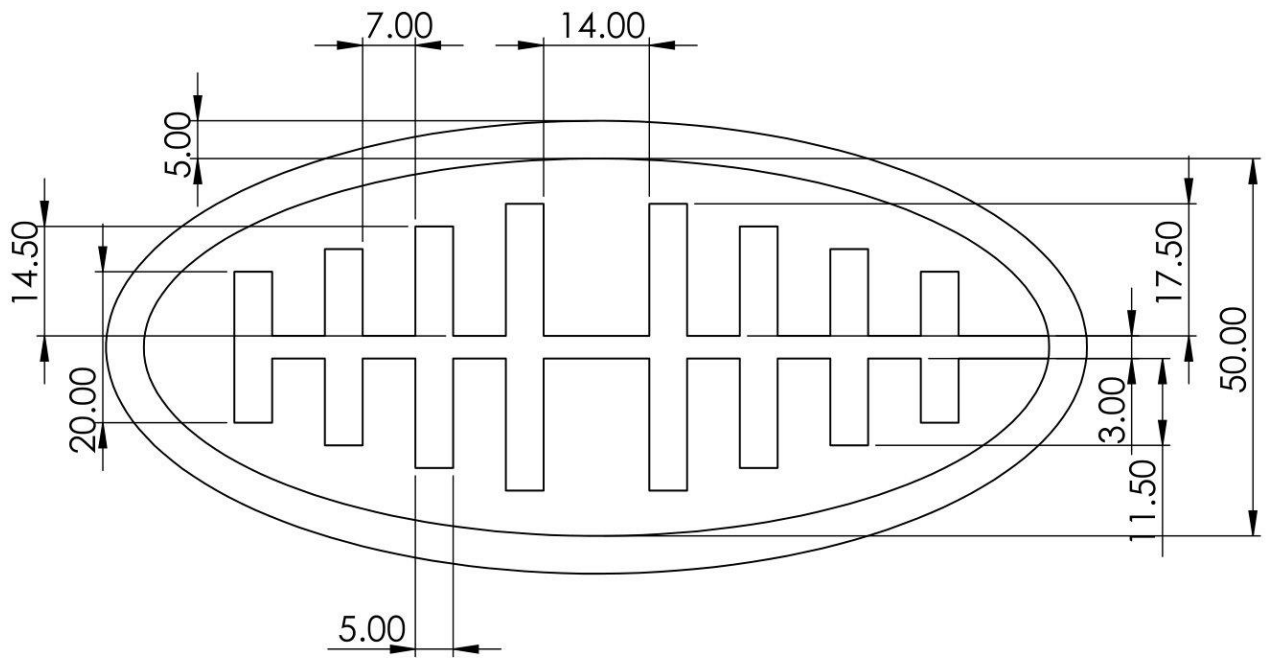
Prueba Tukey

<i>Pairwise Comparisons</i>		HSD _{.05} = 1.1861 HSD _{.01} = 1.5036	Q _{.05} = 3.9583 Q _{.01} = 5.0180
T ₁ :T ₂	M ₁ = 21.93 M ₂ = 26.26	4.33	Q = 14.45 (p = .00000)
T ₁ :T ₃	M ₁ = 21.93 M ₃ = 24.50	2.57	Q = 8.56 (p = .00004)
T ₁ :T ₄	M ₁ = 21.93 M ₄ = 41.20	19.27	Q = 64.32 (p = .00000)
T ₂ :T ₃	M ₂ = 26.26 M ₃ = 24.50	1.76	Q = 5.88 (p = .00251)
T ₂ :T ₄	M ₂ = 26.26 M ₄ = 41.20	14.95	Q = 49.88 (p = .00000)
T ₃ :T ₄	M ₃ = 24.50 M ₄ = 41.20	16.71	Q = 55.76 (p = .00000)

Nota: Los resultados fueron obtenidos a un 95% de confianza con la herramienta disponible de manera gratuita en el sitio web: <https://www.socscistatistics.com/tests/anova/default2.aspx>

Apéndice 8.

Molde con canales para el sistema neumático.

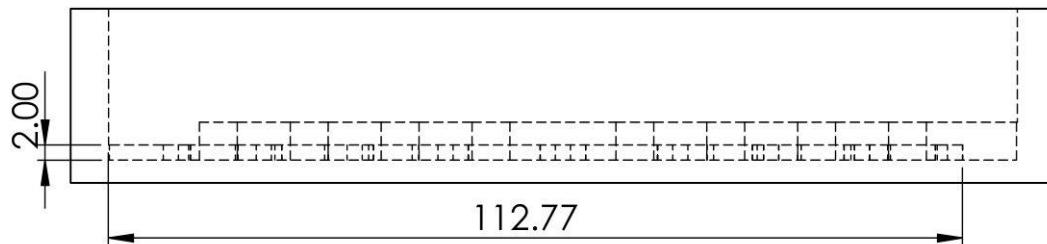
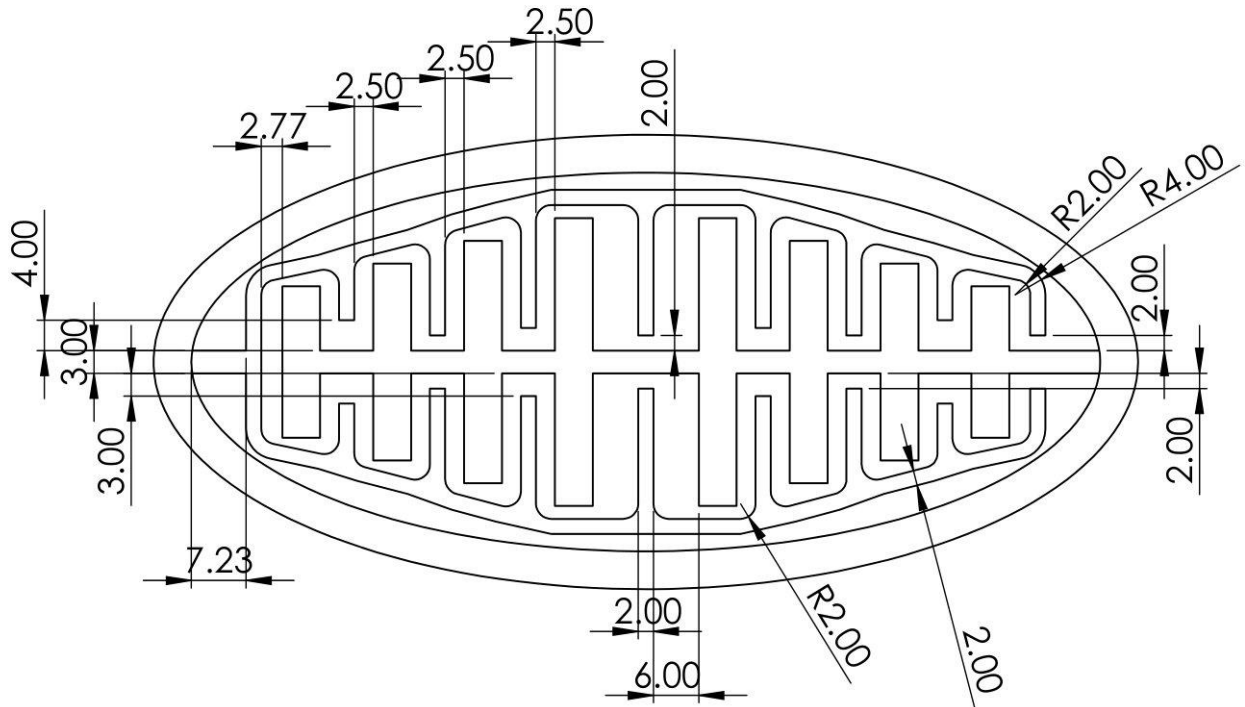


Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica Trabajo Final de Graduación	Nombre: María Fernanda Abarca Jiménez	Molde con Canales para el Sistema Neumático	Carta
	Carné: B50013		

Apéndice 9.

Molde con canales para el sistema neumático y para el sistema de humectación.

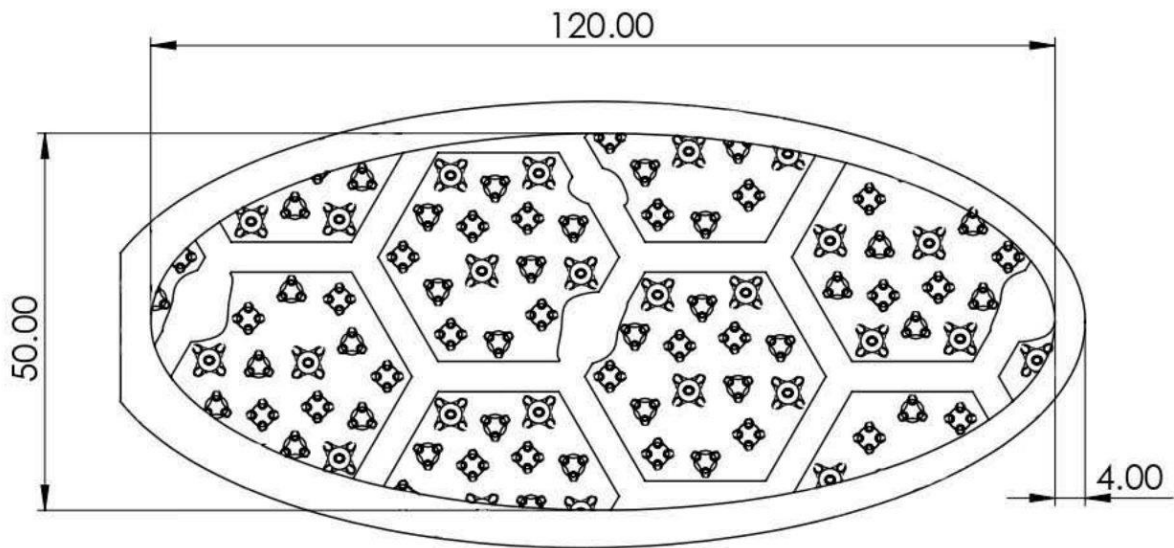
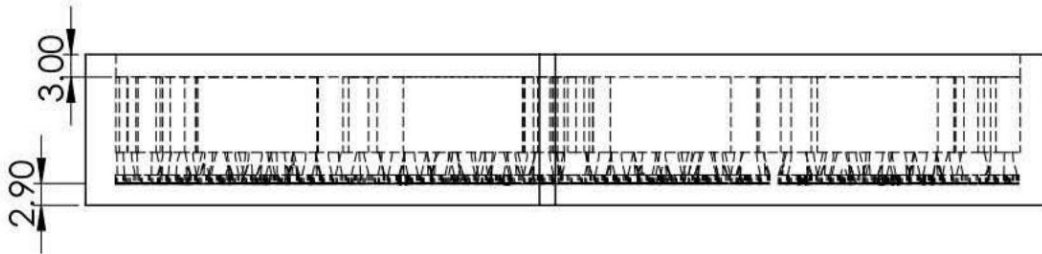
Se mantienen las dimensiones previamente establecidas en el molde con canales para el Sistema Neumático.



Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica Trabajo Final de Graduación	Nombre: María Fernanda Abarca Jiménez	Molde con Canales para el Sistema Neumático y el Sistema de Humectación	Carta
	Carné: B50013		

Apéndice 10.
Molde biotextural en negativo.

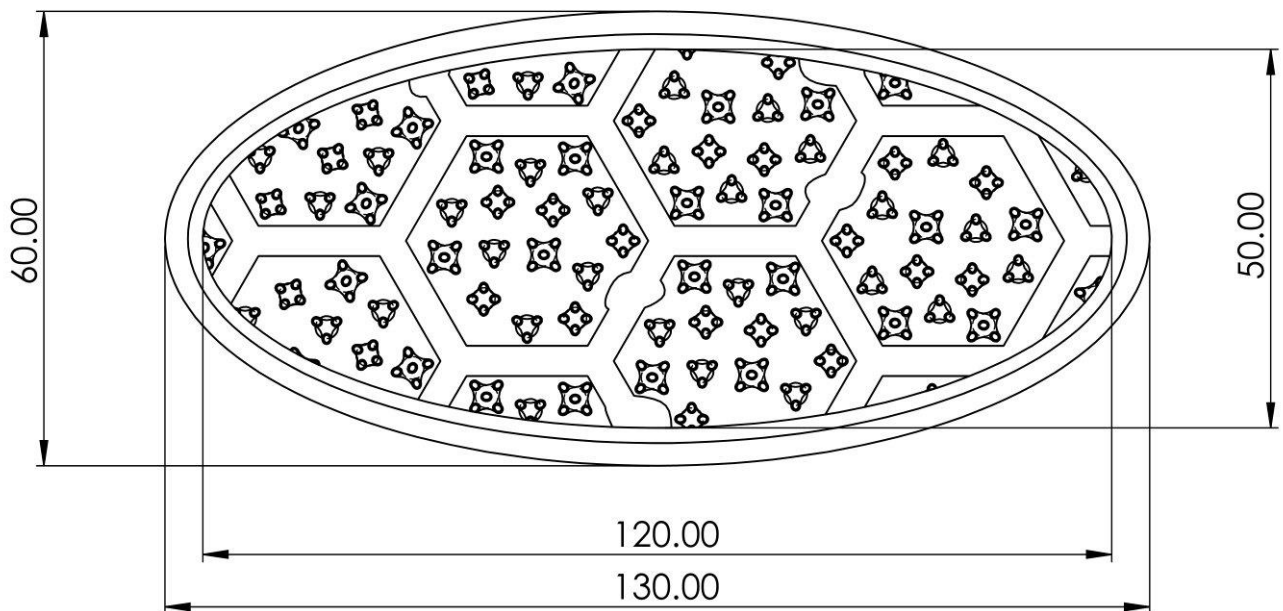
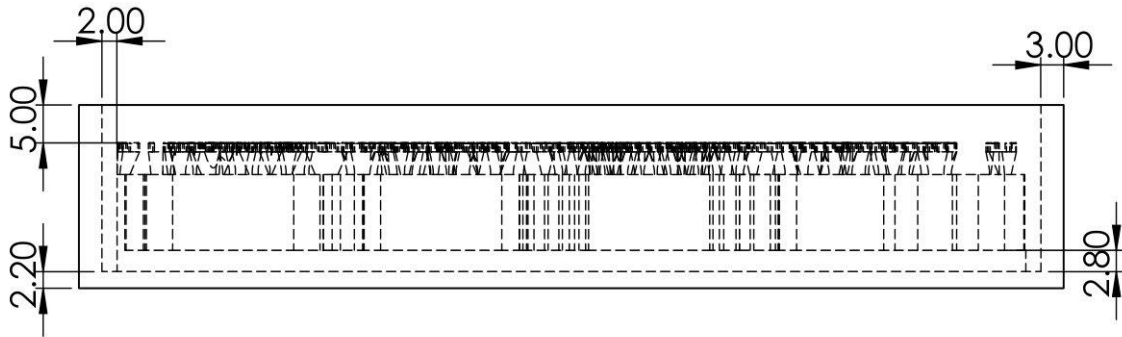
Se mantienen las dimensiones y relaciones establecidas en el diseño de la agrupación celular. La agrupación se incorpora variando su orientación.



Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica Trabajo Final de Graduación	Nombre: María Fernanda Abarca Jiménez	Molde Biotextural Negativo	Carta
	Carné: B50013		

Apéndice 11.
Molde biotextural.

Se mantienen las dimensiones y relaciones establecidas en el diseño de la agrupación celular. La agrupación se incorpora variando su orientación.







Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica Trabajo Final de Graduación	Nombre: María Fernanda Abarca Jiménez	Molde Biotextural	Carta
	Carné: B50013		

Apéndice 12.

Protocolo de preparación de moldes de resina.

PROTOCOLO DE PREPARACIÓN DE MOLDES DE RESINA		CÓDIGO: N/A	
		FECHA DE REVISIÓN: 03 de Febrero, 2023	
DESCRIPCIÓN GENERAL			
<p>En este protocolo se establece el procedimiento que es llevado a cabo para preparar moldes de resina para su utilización con silicona de platino. Esta preparación contempla el retiro de material residual en el molde y solventa la problemática de que el material chorreado no catalice por su contacto con el molde. Este protocolo fue preparado con las recomendaciones del Lic. Jonathan Torres Rodríguez.</p>			
#	HERRAMENTAL/MATERIALES	OBSERVACIONES	
1	Molde impreso en resina	<p>La recomendación hecha por parte del Lic. Torres fue exponer los moldes al sol, sin embargo, se empleó una lámpara ultravioleta para agilizar el proceso.</p> <p>Se recomienda aumentar el tiempo de exposición de los moldes a la luz UV para mejorar el resultado si se notan zonas en las que no resulte el curado del material. En este caso, el molde debe limpiarse bien, secarse y exponerse más tiempo.</p>	
2	Alcohol Isopropílico		
3	Cepillo de dientes		
4	Guantes de Látex		
5	Recipiente apto para calentar		
6	Estufa		
7	Agua		
8	Guantes protectores de calor		
9	Compresor de aire		
10	Lámpara UV		
PROCESO			
<i>Preparación de la disolución</i>			
No	PASO	REFERENCIAS FOTOGRAFICAS	OBSERVACIONES

1	El molde debe sumergirse en alcohol isopropílico durante 5 minutos.		<p>En este caso, para usar la menor cantidad de alcohol posible, se llenó el molde internamente de alcohol y se limpió su exterior con un algodón mojado en alcohol.</p> <p>Lo anterior debido a que la silicona de platino se chorrea en el interior.</p> <p>Se recomienda usar guantes de látex para evitar el contacto con el alcohol.</p>
2	Después, se debe limpiar la zona usando el cepillo de dientes, para remover la resina residual.		Se debe tener cuidado al limpiar con el cepillo, ya que el alcohol sensibiliza la pieza y al restregar, puede romperse alguna estructura de interés.
3	Quitar el alcohol de la pieza.	-	-
4	Secar y remover los restos de alcohol y resina con un compresor de aire.	-	-
5	Exponer el molde a luz ultravioleta durante 4 minutos.		<p>Tener la consideración de que todas las zonas sean expuestas a la luz.</p> <p>Se utilizó la lámpara UV de la marca Magnaflux modelo ZB100F., con una longitud de onda de 365 nm.</p>
6	Colocar el molde en agua y llevar a ebullición.	-	-

7	Una vez hervido, mantenerlo por 10 minutos.		-
8	Luego, secar bien la zona con el compresor de aire.		-

Esta página fue intencionalmente dejada en blanco