



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto de graduación

DISEÑO DE UNA MALLA DE RECOLECCIÓN DE AGUA DE
NEBLINA, COMPUESTA POR CAPAS POLITEXTURADAS,
INSPIRADA EN LOS TRICOMAS DE LA BROMELIA
TILLANDSIA

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Como parte de los requisitos
para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Claire Moy de la Croix Vieto

María Jimena Santamaría Cordero

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Febrero 2022

Hoja del Tribunal

Este avance del 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 de la Escuela de Ingeniería mecánica

_____ Asesora directora

Dra. Hennia Cavallini Solano

Escuela de Ingeniería mecánica

_____ Asesora interna

Mag Ethel Sánchez Chacón

Escuela de Biología

_____ Asesor externo

Dr. Jose Roberto Vega Baudrit

Director Laboratorio Nacional de Nanotecnología

_____ Evaluador externo

Mag. Juan Gabriel Monge Gapper

Escuela de Ingeniería mecánica

_____ Ponente

Claire Moy de la Croix Vieto

_____ Ponente

María Jimena Santamaría Cordero

AGRADECIMIENTOS

A nuestra profesora, amiga y tutora, Hennia Cavallini Solano por confiar en nosotras para el desarrollo de este trabajo, por su paciencia y apoyo incondicional. A José Vega Baudit, Ethel Sánchez Chacón y todas las y los profesores que nos apoyaron en este proceso. Gracias al equipo del LANOTEC y a Rodrigo Mora Bolaños por su paciencia, ayuda y tiempo para hacer este trabajo posible y a nuestra Universidad por tantos años de aprendizaje. A nuestras familias por ser un apoyo invaluable y a la naturaleza por ser fuente infinita de inspiración.

DEDICATORIA

Dedicatoria a nuestros padres y madres, que han sido ejemplo de trabajo, dedicación y amor por lo que hacen.

EPIGRAFE

*“Juntémonos y sigamos con esperanza defendiendo y cuidando la sangre de la
tierra”*

- Berta Cáceres

Índice General

Hoja de Tribunal	ii
Agradecimientos	iii
Dedicatoria	iv
Epígrafe	v
Índice de figuras	ix
Índice de cuadros	xii
Resumen	xiii
1. Introducción	1
1.1 Descripción general	1
1.2 Justificación	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Antecedentes	4
1.5 Metodología y recursos	6
1.6 Alcances y limitaciones	7
2. Marco Teórico	8
2.1 Funcionamiento básico de los colectores de agua de la atmósfera	8
2.1.1 Colectores de agua por niebla	8
2.1.1.1 Concepto de neblina	8
2.1.1.2 Principio de funcionamiento	9
2.1.1.3 Tecnología de las mallas	10
2.1.1.4 Experiencias en otros proyectos	11
2.2 Aplicaciones de biomimética en colección de agua de la atmósfera	13
2.2.1 Colectores bioinspirados en animales	13
2.2.1.1 Escarabajos del desierto de Namibia	13

2.2.1.2 Lagartijas	15
2.2.1.3 Telas de araña	16
2.2.2 Colectores bioinspirados en plantas	18
2.2.2.1 Cactus	18
2.2.2.2 Bromelias	21
2.3 Morfología y fisiología de las Bromelias <i>Tillandsia sp.</i>	23
2.3.1 Tricomas foliares	24
2.3.2 Especies de Bromelias <i>Tillandsia</i>	27
2.4 Mojabilidad de texturas y materiales	29
2.4.1 Definición de mojabilidad, teoría de Wenzel y Cassie-Baxter	29
2.4.2 Método de medición de ángulo de contacto (Gota Sésil)	33
2.4.3 Superficies superhidrofóbicas en plantas	34
2.4.4 Superficies superhidrofílicas en plantas	36
2.4.5 Superficies sintéticas superhidrofóbicas	39
2.4.6 Superficies sintéticas superhidrofílicas	40
2.5 Materiales para las mallas prototipo de recolección de agua	40
2.5.1 ABS con Fibra de Carbono	41
2.5.2 Silicón	42
3. Metodología	43
3.1 Selección de la especie de Bromelia	43
3.2 Prueba de mojabilidad de las especies Bromelia <i>Tillandsia usneoides</i> y <i>schideana</i>	48
3.3 Observación de la microestructura de la Bromelia <i>Tillandsia usneoides</i>	50
3.4 Prueba para la selección de malla comercial	53
3.5 Prueba de ángulo de contacto de los materiales	56
3.6 Medición de histéresis del ángulo de contacto	59
3.7 Prototipo de la malla de recolección	60
3.8 Prueba de capacidad de recolección de agua en mallas prototipo y malla Raschel	64

4. Resultados y análisis	67
4.1 Selección de la especie de Bromelia	67
4.2 Prueba de ángulo de contacto para las especies <i>Tillandsia</i>	68
4.3 Caracterización de los tricomas foliares	69
4.4 Prueba de humidificación y captación de las mallas comerciales	73
4.5 Estructura de mallas prototipo	75
4.6 Mojabilidad de mallas prototipo	79
4.6.1 Prueba de ángulo de contacto en las mallas prototipo	79
4.6.2 Prueba de histéresis del ángulo de contacto en las mallas prototipo	81
4.7 Prueba de capacidad de recolección de agua de mallas prototipo y malla Raschel	82
5. Conclusiones	88
5.1 Conclusiones y aportes de este trabajo	88
5.2 Recomendaciones y trabajo futuro	89
Referencias	89
Anexos	
Anexo A.1. Plano de diseño de capa externa (desordenada) de la malla recolectora . .	99
Anexo A2: Diseño de capa interna (hexagonal) de la malla recolectora	100
Anexo A3: Marco de sujeción de malla recolectora	101

Índice de Figuras

1.1 Sistematización de la metodología (alcance final)	7
2.1 Mecanismo de recolección de agua con neblina	9
2.2 Parte frontal de una malla Raschel	11
2.3 Pruebas piloto de nuevos diseños de colectores	12
2.4 Mecanismo de recolección agua del escarabajo del desierto de Namibia	14
2.5 Morfología de la queratina de la <i>Moloch horridus</i> SEM	15
2.6 Seda de araña artificial que imita la estructura de la seda natural	17
2.7 Técnica para la creación de la tela de araña sintética basada en la inestabilidad de Rayleigh	18
2.8 Mecanismo de colección de neblina de la espina foliar de <i>Opuntia microdasys</i>	19
2.9 Mecanismo de colección de neblina en el gloquidio del cactus <i>Opuntia microdasys</i>	19
2.10 Superficie colectora de neblina con conos hexagonales y tetragonales	20
2.11 Simulación del mecanismo de recolección de agua de la superficie bioinspirada en el cactus	22
2.12 Representación de la vista superior de la capa protectora del tricoma de las Bromelias <i>Tillandsias</i>	24
2.13 Representación de la vista transversal del tricoma foliar de una Bromelia <i>Tillandsia</i> , presentación de la morfología seca y húmeda	26
2.14 <i>Tillandsia usneoides</i>	28
2.15 <i>Tillandsia schiedeana</i>	29
2.16 Relación vectorial entre fuerzas de tensión superficial para material liso	30
2.17 Relación vectorial entre fuerzas de tensión superficial para material rugoso	31
2.18 Caracterización de superficie por ángulo de contacto	31
2.19 Ilustración de teorías de hidrofobicidad	32
2.20 Ángulo de avance y retroceso para histéresis del ángulo de contacto	33
2.21 Montaje para medición de ángulo de contacto con goniómetro	34
2.22 Geometría de células de diferentes tipos de células convexas	34
2.23 Micrografías de barrido de las estructuras de la epidermis de hojas de plantas superhidrofóbicas	36
2.24 Micrografías electrónicas de barrido de estructuras de la epidermis de hojas de plantas superhidrofílicas	38

2.25 Diagrama de estructura típica encontradas en la epidermis de plantas basado en su mojabilidad	39
2.26 Superficies sintéticas superhidrofílicas	40
3.1 Mallas comerciales para la prueba de captación de agua.	54
3.2 Configuración de Mallas SAS y ASA y sus materiales	62
3.3 Diseño de hexágonos para la capa hexagonal	63
4.1 Prueba de ángulo de contacto de Bromelia <i>tillandsia schideana</i>	69
4.2 Puntas de las hojas filiformes de la Bromelia <i>Tillandsia usneoides</i>	70
4.3 Acercamiento del tricoma de la hoja de la Bromelia <i>Tillandsia usneoides</i>	71
4.4 Tricoma con forma de escama peltada de la hoja de la Bromelia <i>Tillandsia usneoides</i>	72
4.5 Estructura del ala del tricoma de la Bromelia <i>tillandsia usneoides</i> y dimensiones de las células del ala (canales)	72
4.6 Vista lateral del ala del tricoma de la Bromelia <i>tillandsia usneoides</i>	73
4.7 Área abierta (libre) y área total de porción de mallas	73
4.8 Deposición de gotas por geometría de malla	75
4.9 Recorrido de la gota y capacidad de acumulación de geometrías	76
4.10 Capas hexagonales diseñadas a) ABS con fibra de carbono b) silicón	76
4.11 Capas aleatorias diseñadas en a) ABS con fibra de carbono b) silicón	77
4.12 Mallas diseñadas a) ASA (ABS, silicón, ABS) b) SAS (silicón, ABS, silicón)	78
4.13 Perfil en capa de silicón	78
4.14 Perfil en capa de ABS con fibra de carbono	79
4.15 Ángulo de contacto en superficie a) de ABS con Fibra de Carbono y b) de silicón	79
4.16 Forma de la gota cayendo por intervalos de 15 segundos	81
4.17. Gráfico de ángulo de contacto de histéresis de silicón y ABS con fibra de carbono en ambos perfiles	82
4.18 Gráfico recolección de agua por malla	83
4.19 Trayectoria de las gotas de la capa desordenada de malla ASA	85
4.20 Gotas de agua en la capa hexagonal de malla ASA	85
4.21 Gotas de agua en capa hexagonal de malla SAS	86
4.22 Trayectoria de las gotas de agua en la malla Raschel	86

Índice de Cuadros

2.1 Especies de plantas para bioinspiración en colectores de neblina	22
2.2 Propiedades físicas del ABS con fibra de carbono para impresión 3D	41
3.1 Protocolo para prueba de sumersión en agua de bromelias	44
3.2 Protocolo para prueba de humidificación en agua de bromelias	46
3.3 Protocolo para prueba de ángulo de contacto de las bromelias	48
3.4 Protocolo para preparación y montaje de muestra de <i>Tillandsia usneoides</i> para MEB	50
3.5 Protocolo para prueba de recolección de agua en mallas comerciales	54
3.6 Protocolo para prueba de ángulo de contacto de los materiales	57
3.7 Protocolo para medición de histéresis del ángulo de contacto	59
3.8 Protocolo para el diseño y fabricación de las mallas de recolección	61
3.9 Protocolo para prueba de recolección de agua en mallas prototipo y malla Raschel	64
4.1 Resultados de pesos y porcentaje de absorción de Prueba de humidificación de Bromelias <i>Tillandsia</i>	67
4.2 Resultados de pesos y porcentaje de absorción de Prueba de absorción de Bromelias <i>Tillandsia</i>	68
4.3 Resultados de volumen de agua recolectado por malla comercial	74
4.4 Superficies interfaciales entre los materiales estudiados	80
4.5 Resultados de velocidad de recolección de agua por malla	83
4.6 Resultados de porcentaje de retención de agua por malla	84

Resumen

El acelerado cambio climático y el crecimiento poblacional instan un reto para la búsqueda de alternativas para la recolección de agua. Para ello, se decidió estudiar un mecanismo natural capaz de recolectar agua eficientemente. Específicamente las bromelias *Tillandsia usneoides* y la *schiedeana*. Ambas fueron sometidas a pruebas de sumersión completa y de humidificación, en cámaras de ambientes controlados y resultó ser la *T.usneoides* la que tiene mayor capacidad de absorción de agua, presentando un porcentaje de 13,6192% mayor en la prueba de sumersión y un 29,1607% mayor en la prueba de humidificación. Se realizó observación microscópica en el MEB de la planta *T.usneoides*, donde se destaca la alta densidad y traslape de los tricomas y la presencia de canales de conducción en las alas; parámetros que se tomaron en cuenta para el diseño de la malla recolectora. Se evaluó la capacidad de absorción de mallas comerciales, para tener un parámetro de comparación con la malla diseñada, siendo la Raschel la más eficiente. Para el diseño de la malla recolectora, se crearon 3 capas, las cuales se traslapan al igual que los tricomas de la Bromelia, dos de ellas (externas) son desordenadas y la interna es una capa hexagonal. Se propusieron 2 configuraciones: ASA (ABS con fibra de carbono en los extremos y silicón en el medio) y SAS el caso contrario. Las capas al fabricarse mediante impresión 3D y moldeo sobre moldes en impresión 3D, presentan un perfil de microondas y micro crestas que promueven la canalización de las gotas. Se realizaron pruebas de mojabilidad (Goniometría e histéresis) sobre los materiales utilizados para la fabricación de las mallas y se realizaron pruebas de recolección de agua en ambiente controlado, en donde la malla ASA presentó la mayor capacidad de recolección, con una velocidad de 0.0794 ± 0.0001 g/min, sin embargo, la Raschel sigue teniendo mejor capacidad, con $0,868 \pm 0.0001$ g/min.

Cítese este trabajo como:

C. Moy de la Croix-Vieto, M.J. Santamaría-Cordero. Diseño de una Malla de Recolección de Agua de Neblina, Compuesto por Capas Politexturadas Inspirado en el Funcionamiento de los Tricomas de las Bromelias *Tillandsia*. Trabajo final de graduación de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Costa Rica. San José, COSTA RICA, 2022.

Abstract

The accelerated climate change and population growth pose a challenge on the search for alternatives on water harvesting. For this reason, it was decided to study a natural mechanism capable of recollecting water efficiently. These are the *Tillandsia* bromeliads, specifically *usneoides* and *schiedeana*. Both species were subjected to complete submersion and humidification tests in controlled environment chambers, and it turned out to be the *T. usneoides* the one with the highest water absorption capacity, presenting a percentage of 13.6192% higher in the submersion test and 29.1607% higher in the humidification test. Microscopic observation of the *T.usneoides* plant was carried out in the SEM, where the high density and overlapping of trichomes and the presence of conduction channels in the wings stand out. These parameters were considered for the design of the collecting mesh. The absorption capacity of commercial nets was evaluated in order to have a comparison parameter with the designed mesh, being the Raschel the most efficient. For the design of the collecting mesh, 3 layers were created, which overlap like the trichomes of the Bromelia, two of them (external) have a random patter and the internal one has a hexagonal pattern. Two configurations were proposed: ASA (ABS with carbon fiber at the ends and silicon in the middle) and SAS the opposite case. The layers when manufactured by 3D printing and molding on 3D printing molds, present a microwave profile and micro ridges that promote droplet channeling. Wettability tests (goniometry and hysteresis) were performed on the materials used for the manufacture of the meshes and water collection tests were performed in a controlled environment, where the ASA mesh presented the highest collection capacity, with a rate of 0.0794 ± 0.0001 g/min, however, the Raschel still has a better capacity, with 0.868 ± 0.0001 g/min.

Capítulo 1

Introducción

En el siguiente capítulo se dará una breve descripción del trabajo realizado, las razones que incentivaron la investigación, así como los objetivos del proyecto. Se comentarán de los trabajos que anteceden y son fundamento de este. Se introducirá la metodología y los recursos necesarios para llevar a cabo el estudio y sus alcances y limitaciones.

1.1 Descripción general

Aproximadamente 4.000 millones de personas se ven afectadas por la insuficiencia de agua al menos durante un mes por año. Dicha escasez se relaciona con fuertes enfermedades y limitaciones en el desarrollo de las clases más vulnerabilizadas (UNESCO, 2019, p.1). Ante la necesidad de afrontar la escasez que se da en la época seca del país y al ser este un recurso indispensable para poder llevar a cabo las labores cotidianas de sanidad, alimentación y producción; se observa la necesidad de diseñar un artefacto capaz de captar agua de la atmósfera, mediante la neblina.

Para ello, se decidió estudiar un mecanismo natural capaz de realizar esta recolección de manera eficiente y bajo condiciones extremas para el país. Se trata de las bromelias, del género *Tillandsia* de tipo atmosférico específicamente, que han sido producto de varios estudios, ya que la mayoría al ser epífitas, captan los nutrientes y el agua del aire (Benzing *et al.*, 1976). Dichas plantas cuentan con abultamientos sobre la epidermis, llamados tricomas foliares, que son su mayor órgano de absorción de agua y nutrientes y además cuidan a la misma de roces, de la luz (Stefano *et al.*, 2008).

Para entender el funcionamiento del tricoma y poder replicarlo en la malla multicapas, se realizó un amplio estudio de la microestructura del tricoma y la mojabilidad de sus superficies. Se hicieron observaciones en el MEB del tricoma de la Bromelia *Tillandsia* y se realizaron mediciones de absorción de agua y mojabilidad en dos especies de este género. Con base a lo observado y analizado de las pruebas experimentales, se diseñaron las capas de la malla recolectora de agua de niebla. Se diseñó un módulo con capacidad de absorber y recolectar agua de manera eficiente, evitando pérdidas de agua por evaporación y obstrucciones en la distribución del agua. Se realizó una comparación de la malla diseñada y una de las mallas más empleadas en el mercado, mediante la colaboración del Laboratorio Nacional de Nanotecnología y el apoyo de las y los profesores asesores.

1.2 Justificación

El agua se considera como un derecho fundamental para los seres humanos según la Organización de las Naciones Unidas, ya que ésta brinda las posibilidades para el desarrollo de una vida digna, en términos de seguridad alimentaria, saneamiento, desarrollo económico y sostenibilidad ambiental (UNESCO, 2019, p.1). Sin embargo, el acceso a la misma no es equitativo y limita el progreso de las clases más vulnerabilizadas, convirtiéndose en un factor de desplazamiento que aumenta la urbanización y desencadena el crecimiento demográfico (Altamarino, 2014). A pesar de ello, no todas las personas que se ven afectadas por la problemática de la escasez del agua tienen la posibilidad de migrar a centros urbanos, porque su economía depende de la localidad en donde se encuentran, por ejemplo, las y los pequeños agricultores.

De forma paralela la degradación ambiental y el cambio climático se agravan; así mismo, como la necesidad y el uso del agua van en aumento, no solo por el crecimiento poblacional, sino también por la intensificación y explotación de las labores productivas que requieren de este recurso. Mundialmente, el uso del agua ha venido incrementando un 1% al año desde los años 80. De seguir así, se esperaría que para el 2050 haya un aumento del 20% al 30% superior al uso actual. En un mundo donde aproximadamente 4.000 millones de personas se ven afectadas por la insuficiencia de agua al menos durante un mes por año (UNESCO, 2019, p.1), es de esperar que los niveles de escasez se intensifiquen, así como el crecimiento de la desigualdad y además las oportunidades para el desarrollo digno se vean aún más limitadas.

Costa Rica a pesar de ser uno de los países con mejores servicios de abastecimiento y sanidad de la región latinoamericana (UNESCO, 2019, pp.163-164), no queda absenta a la problemática, especialmente en las zonas rurales de la Zona Norte y Pacífico Norte, donde además de considerarse lugares de alta vulnerabilidad por su bajo índice de desarrollo humano, son los más expuestos a riesgos por eventos excesivamente secos (MINAE y IMN, 2012) y encima una gran parte de su economía depende de la agricultura, que puede verse terriblemente afectada por dichas sequías. Considerando lo mencionado anteriormente, es importante tomar las medidas necesarias para la adaptación ante la variabilidad y cambio climático y poder garantizar con ellas la seguridad alimentaria y la vida digna de las personas más abandonadas en el país.

Ante la búsqueda de dichas alternativas, se consideró necesario llevar a cabo un proyecto ingenieril, en donde se diseñe una malla de captación de neblina, con el propósito a largo plazo de combatir las sequías y sus afectaciones, y de esta manera enfocar la ciencia al servicio de las comunidades del país. Para ello, se decidió emplear la biomimética, que permite mediante la observación de la naturaleza, desarrollar tecnologías al aplicar los mismos principios que la rigen, esta imitación de mecanismos ha resultado como un método bastante efectivo a lo largo de la

historia, cuando el ser humano ha tenido que enfrentarse a la búsqueda de alternativas para el cambio (Hwang *et al.*, 2015). Más recientemente dicha bioinspiración, retoma importancia para tratar problemas ambientales y energéticos (Shimomura, 2010).

A pesar de que ya existen algunos métodos de recolección de agua de la atmósfera, esta industria tiene pocos años de estudio científico, empezando a proyectarse alrededor del mundo en 1995 después del éxito de una investigación chilena en el desierto de Atacama (Fessehaye *et al.*, 2014), lo cual es poco en términos de desarrollo tecnológico, siendo necesario seguir avanzando en investigación para poder proveer mejoras significativas en la cantidad de agua que se puede recolectar. Muchos de los diseños ya construidos están inspirados en seres vivos que a pesar de la extrema escasez de agua en la que habitan han evolucionado para sobrevivir en estas condiciones (Jarimi *et al.*, 2020). Se destaca el estudio de los escarabajos *Stenocara gracilipes*, encontrados en el desierto de Namibia (Garrod *et al.*, 2007), de las lagartijas *Moloch horridus* ubicadas en zonas áridas (Browm y Bhushan, 2016), arañas como las *Uloborus walckenaerius* que utiliza su telaraña para recolectar agua (Shang *et al.*, 2007) y también plantas como el cactus *Opuntia microdasys* del desierto de Chihuahua (Ju *et al.*, 2012) y *Lychnis sieboldii* en Japón (Ito *et al.*, 2015). Entre otros seres vivos que muestran en sus morfologías adaptaciones al contacto con el agua, mecanismos y texturas hidrofílicas e hidrofóbicas que permiten la absorción y distribución del recurso capturado, que han funcionado como bases fundamentales para las adaptaciones de los colectores más eficientes.

A partir de esto, se consideró importante investigar el mecanismo y textura de las bromelias que pueden sobrevivir en condiciones limitadas de agua, específicamente las especies epífitas, que se ha demostrado obtienen sus recursos de agua mediante la captación atmosférica, como se detalla en la siguiente sección. Algunas de las especies de las que ya se han realizado estudios de su buena capacidad de absorción, se encuentran en Costa Rica, por lo que resulta ventajoso para la adaptación a las condiciones del país. De esta manera se desea con este proyecto aportar a las investigaciones de recolección de agua de rocío y neblina, desde la biomimética.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una malla multicapas politexturadas, para la recolección de agua proveniente de la neblina, basado en el mecanismo y la microestructura de los tricomas de la *Bromelia Tillandsia*, con el propósito de proporcionar una alternativa limpia, en tiempos de escasez de este recurso.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar los mecanismos de recolección de agua y la microestructura de las Bromelias *T.usneoides* y *T.schiedeana*.
- Modelar dos prototipos de mallas multicapas para la recolección del agua de neblina, bioinspirado en el mecanismo y las microestructuras estudiadas.
- Evaluar la captación, distribución y recolección del agua de las mallas prototipo y comparar su eficiencia con una malla comercial estándar.

1.4. Antecedentes

Las bromelias son un grupo de plantas con un amplio rango morfológico y fisiológico de estrategias de uso de agua, por lo que esta familia se puede encontrar en todo tipo de hábitat, desde el más árido al más húmedo (Reyes *et al.*, 2008). Entre estas existe el género *Tillandsia* sp. de tipo atmosférico, que ha sido producto de varios estudios, ya que la mayoría al ser epífitas, captan los nutrientes y el agua del aire (Benzing *et al.*, 1976). El 20 de enero del 2020, Pascal S. Raux, Simon Gravelle y Jacque Dumais hicieron un diseño que imita el mecanismo de absorción de agua de las *Tillandsia* sp. Basaron su diseño en la *T.landbeckii*, ya que esta se encuentra en uno de los hábitats más áridos, el desierto de Atacama, Chile (Raux *et al.*, 2020).

El tricoma foliar es el mayor órgano de absorción de humedad en las Bromelias. Estos son abultamientos sobre la epidermis que cuidan a la misma de roces, de la luz y se encargan de absorber el agua y los nutrientes de la atmósfera (Stefano *et al.*, 2008). El propósito de este diseño es dar a conocer cómo los tricomas de las *Tillandsia* sp. son capaces de absorber gotas de agua cuando hay neblina o alta humedad y a la vez prevenir la evaporación en ellas cuando se expone a condiciones áridas.

Para poner a prueba el funcionamiento del tricoma los científicos replicaron en su laboratorio las alteraciones entre períodos cortos de neblina y periodos extensos (de varios días) de sequía en las que habita la *T.landbeckii*. Evidenciaron que las hojas de la especie fueron capaces de acumular rápidamente el agua durante los periodos de humedad. Además, descubrieron que estas tienen la habilidad de reducir o aumentar la conductancia de vapor de agua (Raux *et al.*, 2020; Brighigna *et al.*, 1998). Esto se debe a que las células en la parte externa del tricoma, conocidas como “shield cells” o células del disco central, son altamente higroscópicas. Los materiales y células higroscópicas tienen una resistencia a la conducción de agua que varía con el contenido de humedad de la misma (Lag *et al.*, 2008). Cuando el entorno es muy húmedo ellas se inflan por encima de la epidermis, aumentando su porosidad, lo que permite mayor flujo de agua líquida hacia la parte interna del tricoma. Luego, cuando el entorno es seco, esta se hunde

hacia las células vivas, bloqueando la salida del vapor de agua (Kulasinski *et al.*, 2015). Se podría decir que funcionan como una válvula inteligente para el tricoma, en donde puede variar la conductancia al agua dependiendo de las condiciones externas y necesidades de la planta.

El funcionamiento del tricoma se comparó con las raíces de las plantas suculentas. Comprobaron que el tricoma de la *Tillandsia* sp. no destaca en ser el de mayor conductancia para absorber agua. Pero, a diferencia de otras plantas que sí, estas son las únicas que también logran tener una alta resistencia a la salida del agua por evaporación. Es por esta razón, que los científicos concluyen que la *Tillandsia* sp. ofrece grandes innovaciones para los diseños de captación de agua por humedad (Raux *et al.*, 2020).

Además de las bromelias, la inspiración de la naturaleza para la captación de agua remonta hace más de 400 años atrás, en donde en las Islas Canarias las personas obtenían agua de unos árboles conocidos como “árboles de lluvia”. Estos pertenecen a la familia de los laureles, científicamente se conocen como *Ocotea foetens*. Colocaban un recipiente debajo del árbol y ahí caían las gotas de agua capturadas por la superficie de las hojas al entrar en contacto con la humedad del aire (Gioda *et al.*, 1995). El estudio científico de la recolección de neblina empezó en el siglo 20 por el pionero Marloth en Sudáfrica. Empezaron por utilizar pluviómetros para lograr cuantificar el volumen de agua recolectado por diferentes plantas, dado a la humedad. Con base a estos estudios descubrieron el potencial de la recolección de agua del aire, y de ahí surgieron varios proyectos (de Buys *et al.*, 2014). En 1980 se construyó el proyecto más grande de colectores de humedad en su tiempo, con 100 mallas Raschel, hechas con fibras de polietileno, de 12 metros de ancho y 4 de alto en el norte de Chile. El proyecto logró abastecer a las 300 personas de la zona con 33 litros de agua por día (Lerrain *et al.*, 2002). Dado su gran éxito, se empezaron proyectos de estos, alrededor de todo el mundo, en especial las zonas de clima seco donde existe escasez de agua.

A partir del diseño tradicional de colocar la malla de polietileno perpendicularmente contra el viento, se experimentó con otras alternativas de posición y material. Por ejemplo, en Perú existe el colector “Eiffel” que contiene 9 paneles de mallas de hilo polimérico (Domen *et al.*, 2014). En Sudáfrica han estado utilizando mallas de polímeros tejido sobre acero inoxidable para mayor estabilidad y fuerza (Jarimi *et al.*, 2020). Namib ha sido sede de varios proyectos, entre ellos una malla cúbica tridimensional resistente a las tormentas de viento en la zona, ya que el diseño chileno con mallas Raschel no aguantó esas condiciones extremas (Jarimi *et al.*, 2020; Makuti *et al.*, 2004).

Hoy en día hay mallas colectoras de agua de todo tipo de materiales, formas y distribución, lo cual influye en la cantidad de agua recolectada. Aun así, la cantidad de agua recolectada en cada proyecto va a variar por otros factores externos al diseño, como por ejemplo

la velocidad del viento, la altura de la instalación y entre otros. Por lo que no es muy efectiva la comparación de parámetros de colección de agua entre los tipos de mallas que se encuentren en diferentes lugares del mundo. Se puede estimar únicamente que la colección de agua de estos proyectos ronda entre $1 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ a $12 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ (Azad, 2016a).

Recientemente, se ha aplicado la biomimética para el diseño de recolectores de agua del aire más modernos y eficientes que los diseños tradicionales. El estudiante de matemáticas y ciencias naturales, Abul Kalam Azad, de la Universidad de Bonn elaboró una investigación “Colección de humedad en la superficie de las plantas y las aplicaciones en biomimética” en enero 2016 con el propósito de desarrollar nuevos y superiores diseños para optimizar la función de los colectores de humedad. En el estudio se analiza la capacidad de recolección de agua y microestructura de varias plantas de estructura cónica entre estas la *Hordeum*, *Abies*, *Pinus*, *Sequoiadendron*, *Sequoia* y la *Tillandsia* (Azad, 2016a). De las mencionadas, todas a excepción de la *T.usneoides* poseen espinas. Se comprobó que las espinas facilitan la obtención de agua, la planta que recolectó más cantidad de agua fue la *Hordeum* ya que tiene espinas y además es hidrofílica. El resto de los tipos que sí poseen espinas tuvieron problemas de obstrucción por ser hidrofóbicas, ya que a cierto punto las gotas de agua se acumulan en la base de la espina. La *T.usneoides*, a pesar de no tener espinas tiene tricomas super-hidrofílicos, lo que le permite una recolección de agua más rápida y efectiva que las de espinas hidrofóbicas (Brighigna *et al.*, 1988). Basado en estos resultados y simulaciones virtuales se elaboró una malla con una fibra microondulada, lo que ayuda a tener mayor transporte de agua y eficiencia de drenaje. Se concluyó que al tener una fibra de superficie superhidrofílica se mejora el flujo de las gotas de agua, evitando la acumulación de estas en la fibra (Azad, 2016b).

1.5. Metodología y recursos

A continuación, se listan los pasos para la metodología propuesta. En la Figura 1 se muestra de manera sistemática.

1. Análisis de las microestructuras y sistemas asociados a la recolección del agua de la Bromelia *Tillandsia*
2. Evaluación de los mecanismos de absorción de agua de al menos 2 especies de Bromelia *Tillandsia* por:
 - 2.1. Medición de la mojabilidad (LANOTEC)
 - 2.2. Pesos en ambientes controlados (LAPCI)
3. Análisis microestructural con MEB (LANOTEC)

4. Diseño del prototipo
5. Evaluación del prototipo (laboratorio)

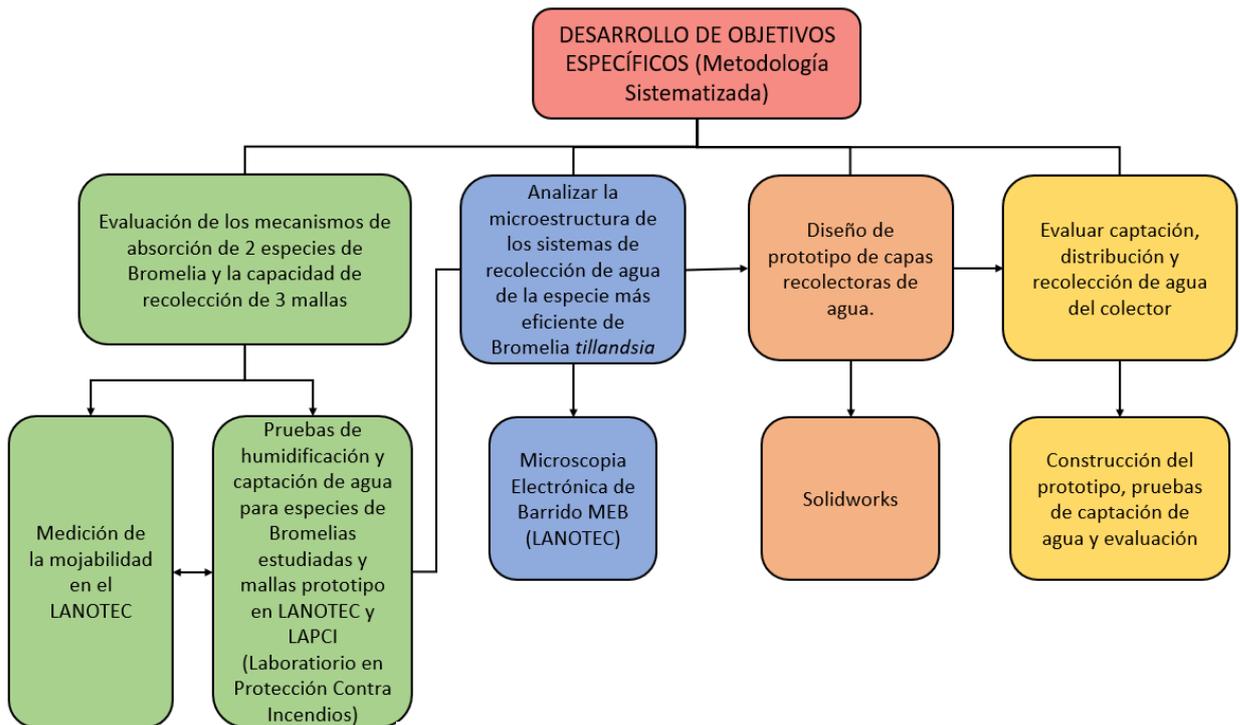


Figura 1.1. Sistematización de la metodología (alcance final). Elaboración propia

1.6. Alcances y Limitaciones

Alcances:

- Se modelaron y evaluaron 2 prototipos de mallas de recolección de agua que servirán como prototipo para futuras investigaciones.

Limitaciones:

- Las pruebas realizadas en los prototipos de mallas pueden diferir al escalar las mallas a dimensiones apropiadas para la recolección (48 m²)
- Al emplear impresión 3D para los prototipos de mallas se debe de considerar el uso de impresoras con dimensiones de mesa más amplias y un diseño modular de la malla que permita el ensamble de sus partes.
- Los diseños elaborados de las mallas son de uso libre.
- La calidad de agua producida puede variar dependiendo de la zona de captación, el consumo de esta queda bajo la responsabilidad de cada persona, se recomienda realizar análisis de calidad de agua y emplear un sistema posterior de desinfección.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Funcionamiento básico de colectores de agua de la atmósfera

El aire atmosférico es una fuente renovable de agua para todas las partes del mundo. En el planeta hay 1200 km³ de agua fresca mientras que en la atmósfera hay 14 000 km³ de agua. El agua en la atmósfera se encuentra en forma de vapor de agua (Hamed *et al.*, 2010). Por la escasez del agua de fuentes superficiales y perforadas, se vuelve necesario dirigir el conocimiento científico para buscar alternativas para la recolección de agua de la atmósfera, siendo ésta, una fuente tan abundante en agua. Es por eso por lo que en las últimas décadas se han estudiado los colectores de agua tanto de neblina como de rocío. En el presente capítulo se presentarán específicamente los colectores de niebla, se hablará de las condiciones atmosféricas necesarias para que exista este fenómeno, tipos de colectores, diseños que se han propuesto en los últimos años y desafíos que presentan en la actualidad.

2.1.1 Colectores de agua por neblina

2.1.1.1 Concepto de neblina y condiciones climáticas para su formación

Según el glosario de meteorología de Todd Glickman (2000), la niebla o neblina se define como una nube que toca la superficie del suelo. Para efectos prácticos, especialmente en la aviación, se suele especificar que reduce la visibilidad horizontal a menos de 1000 m. Valores menores a este siguen siendo niebla, solamente que cambia su tipo de clase según la densidad. Una gota de niebla tiene diámetros que varían entre 1 y 40 micrómetros. En general son pequeñas gotas de agua líquida que según manifiesta Sampurno *et.al.* 2005 pueden surgir de tres maneras diferentes, por la condensación del vapor de agua, remanentes de gotas del mar o bien gotas de lluvia evaporadas.

El aire a una temperatura dada puede contener solamente una cierta cantidad de vapor de agua. Sin embargo, esta cantidad puede variar de manera proporcional según cambie su temperatura; existe un aumento si sube la temperatura del aire, así como disminuye a medida que decrece la temperatura. Por lo tanto, si la temperatura del aire de una masa de aire saturada disminuye, el exceso de vapor de agua del aire se condensa para formar niebla. Las gotas de niebla se empiezan a formar tan pronto como la temperatura cae por debajo del punto de rocío local, siempre y cuando existan núcleos de condensación, que permitan que se lleve a cabo este

fenómeno, sin necesidad de exceder el 100% de humedad relativa (Sampurno *et al.* 2005). Los núcleos de condensación son pequeñas partículas que se encuentran presentes en la atmósfera, por ejemplo, el polvo o la sal marina que funcionan como superficies para que se lleve a cabo la condensación, entre más higroscópica sea la partícula, más eficiente es el proceso de formación de agua (Farmer *et al.*, 2015).

En la práctica, las técnicas de recolección del agua a través de la neblina se suelen hacer en zonas áridas y semiáridas, cercana a los océanos, donde las nubes son formadas sobre el mar y empujadas por los vientos hacia las zonas terrestres y se convierten en niebla al interceptar alguna posible cadena montañosa cerca. Además, los océanos son una de las mayores fuentes de vapor de agua, la combinación de un océano cerca de una costa montañosa es muy favorable para la colección de agua por neblina (Fessehaye *et al.*, 2014).

2.1.1.2 Principio de Funcionamiento de Colectores de Neblina

El método tradicional de colectores de niebla consiste en colocar una malla expuesta al ambiente perpendicular a la dirección predominante del viento, la cual funciona como una superficie de impacto para recolectar las gotas de la neblina conducida por el viento. La malla se sostiene mediante dos postes y cables de sujeción que permiten la suspensión de esta. Las pequeñas gotas de agua que quedan atrapadas en la malla se acumulan para formar gotas más grandes, hasta que gotean hacia abajo mediante la acción de la gravedad, a unos canales adjuntos de los sistemas de recolección de agua, tal como se muestra en la siguiente imagen:

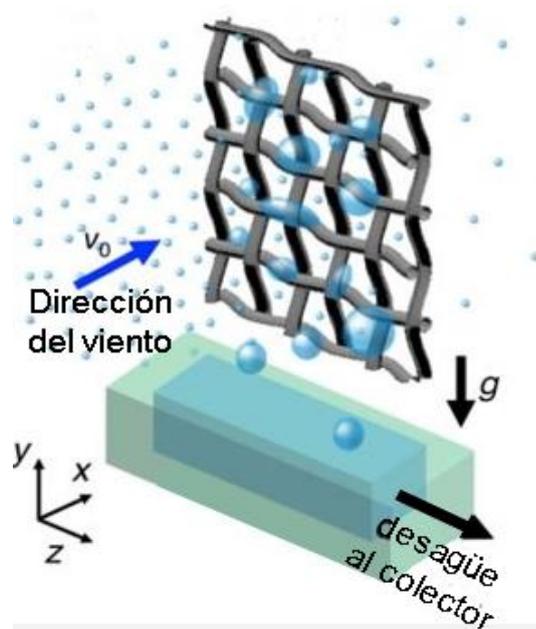


Figura 2.1. Mecanismo de recolección de agua con neblina. Modificado de Park *et al.*, 2013

Según destaca Jarimi *et al.* (2020), comúnmente los colectores de niebla se clasifican en estándar (SFCs) y colectores de niebla largos (LFCs) por sus siglas en inglés. Los primeros se utilizan típicamente para cuestiones investigativas, por ejemplo, para poder evaluar la cantidad de agua que puede ser recolectada para una condición específica. Comúnmente tienen una dimensión de (1 x 1) m² y su base se coloca a 2 m del suelo. Por otra parte, los LFCs se utilizan para cuestiones prácticas por lo que su tamaño es mayor al anterior, tiene dimensiones de aproximadamente 48 m². Típicamente son capaces de producir alrededor de 150 l a 750 l de agua al día, con costos de aproximadamente \$400.

2.1.1.3 Tecnología de las Mallas

Comúnmente los materiales de la malla que se utilizan son polipropileno o polietileno con un coeficiente de sombreado de 35%. El coeficiente de sombreado (s) corresponde a la porción del área del colector que es capaz de capturar las gotas de niebla y se calcula con la siguiente ecuación (Rivera, 2011):

$$s = 1 - f \quad (2.1)$$

Donde f corresponde a la relación de flujo libre, que se define como el área de las aberturas de la malla (A_{op}) entre el área total de la misma (A):

$$f = \frac{A_p}{A} \quad (2.2)$$

También se han estudiado otro tipo de tejidos como redes de sombra de aluminio o de acero inoxidable. Comercialmente se utiliza la malla tejida de polietileno de alta densidad, Raschel, con recubrimiento para resistencia UV, que es utilizada para dar sombra a cultivos en zonas calientes (Jarimi *et al.*, 2020). Ésta es tejida en un patrón semi-triangular con una fibra horizontal de 1,0 mm de anchura y fibras triangulares de 1,6 mm de ancho con 0,1 mm de espesor (Fessehaye *et al.*, 2014). El semi-triángulo formado entre los tejidos se conoce como poro, tal como se muestra en la figura 2.2b. Se ha estudiado que el ancho de la fibra tiene un efecto directo en la recolección de las gotas de niebla. Es decir, tener 10 fibras de 1,0 mm de ancho generan más agua que tener una sola fibra de 10 mm de ancho.

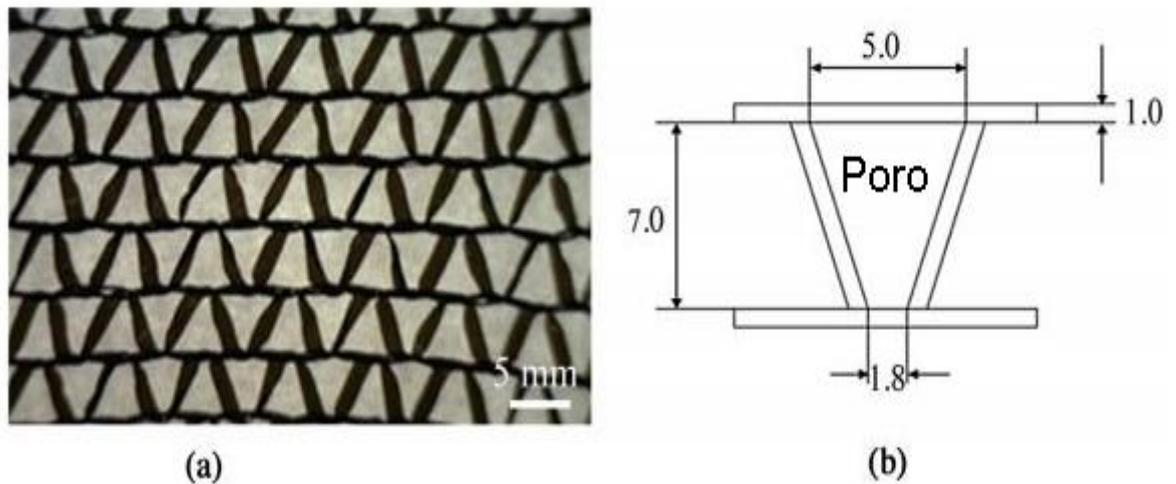


Figura 2.2. (a) Parte Frontal de una malla Raschel (b) Dimensiones de los poros en milímetros. Modificada. Fuente: Rajaram et al., 2016

En general existen diferentes razones que pueden afectar la eficiencia de las mallas de recolección. Entre ellas se pueden mencionar tres que influyen principalmente: la obstrucción del viento producida por el mismo colector, que provoca que el flujo del aire sea dividido y pase alrededor de la malla. Después, sólo un porcentaje de las gotas de niebla que sí pasan por el colector son capturadas, debido a que algunas otras no tocan las fibras de la malla y pasan en medio de los poros. Por último, una vez atrapadas las gotas en la malla, algunas de ellas reingresan al flujo del aire, antes de ser recolectadas en los canales de drenaje inferiores. (Rivera, 2011).

2.1.1.4 Experiencias en otros proyectos y desafíos

Uno de los principales problemas que presentan los LFCs, es que el viento ejerce presión sobre la malla, la cual a su vez impone fuerzas sobre las estructuras de soporte, hasta que éstas ceden y se quiebran. Por esta razón es que se han empezado a utilizar mallas de polímeros tejido sobre acero inoxidable para dar mayor estabilidad y fuerza, sin embargo, aún hay mucho por mejorar en este aspecto. También se presenta el inconveniente de que la malla y otros componentes del colector, pueden ser dañados por la radiación ultravioleta u otros factores ambientales (Jarimi *et al.*, 2020). Entre más problemas se presenten, más estrictos tienen que ser los regímenes de mantenimiento, entre los cuales ya incluyen: revisión y ajuste de los cables que sostienen la malla, reparación de roturas de esta, limpieza de los poros para que no se obstruya el flujo de aire con escombros o algas, entre otras.

Según resultados recientes, se demostró que tan solo el 2% de las gotas de agua que pasan por la malla típica Raschel, son recolectadas por la misma. Por lo que se han realizado investigaciones para mejorar su eficiencia utilizando geometrías distintas a la triangular y revestimientos sobre la superficie para hacerla más hidrofílica o hidrofóbica, dependiendo del

enfoque de la investigación. Para ello, Rajaram *et.al.* proponen usar revestimientos sobre la malla y espacios estrechos de las bandas, que permitan: aumentar el ángulo de contacto y al mismo tiempo reducir el efecto de fijación de las gotas. Siendo, según los estudios NeverWet y Hydrobead, los recubrimientos que satisfacen ambos requisitos y aumentan en un 50% la eficiencia de recolección de las mallas.



Figura 2.3. Pruebas piloto de nuevos diseños de colectores. a) Colector Eiffel. b) Colector de arpa. c) Colector de arpa diagonal. Fuente: Domen, *et.al.* 2013

Entre los diferentes diseños de colectores de niebla, a continuación, se mencionan tres clases que han permitido satisfacer algunas de las problemáticas que se presentan para la recolección de agua. En primer lugar, se tiene el colector “Eiffel” (Figura 2.3a) que es utilizado en lugares con condiciones atípicas, donde no predomina una única dirección del viento. Se presenta como una propuesta prometedora porque produce 10 veces la cantidad de agua que un colector de niebla estándar de la misma dimensión. Este tiene incorporado 10 tiras, que están amarradas diagonalmente entre dos capas (con dimensiones de 8 m x 4 m), las cuales tienen un coeficiente de sombreado (s) del 50% y se encuentran separadas 0,3 m entre ellas, formando así una estructura tridimensional que permite recolectar agua de la niebla en distintas direcciones (Domen, *et.al.* 2013).

Además, se tienen los colectores conocidos como "arpa" (Figura 2.3b) y el "arpa diagonal" (Figura 2.3c). Ambos tienen marcos de metal con dimensiones de 2 m x 4 m x 0,3 m. La diferencia yace en que el colector de “arpa”, cuenta con cuerdas de goma con un largo de 2,256

m y un espesor de 1.5 mm y se instalan de forma vertical. Por otra parte, las cuerdas del colector en “arpa diagonal” tiene dimensiones de 1.520 m de largo y 1.5 mm de espesor. Los rendimientos de recolección de agua rondan entre los 62.7 litros por día y 28.6 l/día, respectivamente (Jarimi *et.al.* 2020).

2.2. Aplicaciones de biomimética en colección de agua de la atmósfera

La biomímesis busca inspiración en la naturaleza para proponer soluciones sostenibles a los desafíos de la vida humana. Con el propósito de adaptar nuevas tecnologías que imitan los patrones y las estrategias encontradas en la naturaleza (Azzi y Beyrouthy, 2015). Actualmente, se ha aplicado para encontrar nuevas tecnologías sostenibles de recolección de agua, como preparación a la alta demanda de esta que se aproxima en pocos años por el aumento de la población mundial y los efectos del cambio climático (Brown y Bhushan, 2016).

El agua es vital para la subsistencia de todos los organismos, ya sean vegetales o animales. Se han hecho varios estudios específicamente de la flora y fauna que habitan en zonas áridas, ya que estas tienen mecanismos adaptados para captar agua de la atmósfera. Las especies capaces de recolectar niebla o rocío típicamente tienen una superficie tridimensional que les permite prevenir que las pequeñas gotas recolectadas, se evaporen o reingresen al flujo del viento antes de poder ser ingeridas o almacenadas (White *et al.*, 2013). A partir de ello, los materiales utilizados para los colectores de agua por rocío y neblina se han visto influenciados, por las texturas encontradas en los animales y las plantas que habitan en este tipo de zonas.

Según Commans (2018), los procesos de recolección de agua contemplan distintas adaptaciones tanto estructurales como químicas. A partir de esto, se ha logrado identificar seis mecanismos básicos en la recolección de agua que utilizan las distintas especies: (1) Aumento de la mojabilidad de la superficie. (2) Aumento en el área de propagación. (3) Transporte del agua en distancias relativamente largas. (4) Acumulación y almacenamiento del agua recolectada. (5) Facilitación del proceso de condensación y por último (6) el uso de la gravedad.

2.2.1. Colectores bioinspirados en animales

2.2.1.1. Escarabajos del desierto de Namibia (*Stenocara gracilipes* y *Onymacris unguicularis*)

El desierto de Namibia se encuentra en el sur de África. Es una de las regiones más áridas del mundo, con un promedio anual de lluvia de 1,8 centímetros (Shanyengana *et.al.* 2002). En él

habitan 2 especies de escarabajos (*Stenocara gracilipes* y *Onymacris unguicularis*), que a pesar de la escasez de lluvia logran recolectar agua de la neblina que llega a las partes más altas del desierto. Para lograr esto, el escarabajo eleva sus patas traseras hasta quedar en una posición inclinada con su cabeza abajo, en contra de la dirección del viento predominante, como se observa en la figura 2.4. Además, tiene en su parte posterior una serie de bultos de 0.5 mm de diámetro, los cuales se encuentran acomodados de manera aleatoria y separados entre sí aproximadamente entre 0,5 - 1.5 mm (Nørgaard, *et.al.* 2010). El espacio entre los bultos (los valles), son una superficie cubierta con un tipo de cera hidrofóbica que provoca que las gotas pequeñas de niebla no se distribuyan en dichas superficies y, por lo contrario, se resbalen hasta los bultos, que son hidrofílicos. Para que en ellos se vayan acumulando las pequeñas gotas hasta formar una gota más grande, la cual, por acción de la gravedad, dada la inclinación del escarabajo, se desliza hacia su boca (Brown *et al.*, 2016).

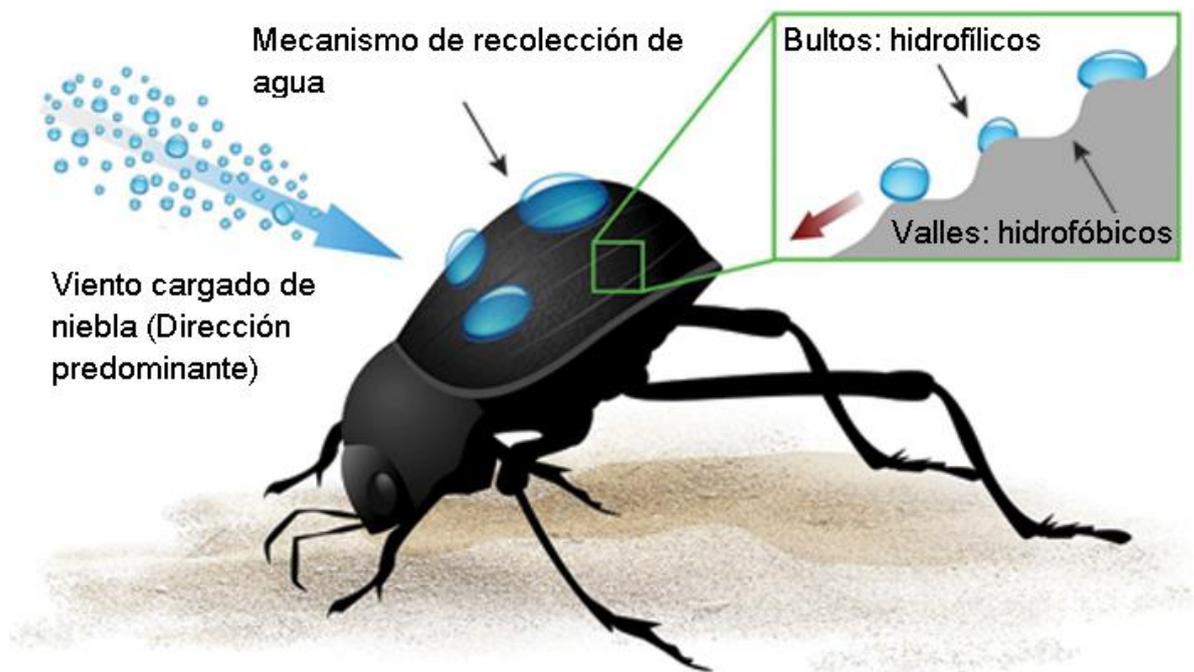


Figura 2.4 Mecanismo de recolección de agua de niebla de escarabajo del desierto de Namibia. Modificado de: Industrial Laser Solutions, 2018

Una vez que se observó la alta capacidad de recolección de agua de estos escarabajos fue que se iniciaron los estudios para poder imitar sus texturas y superficies. Se descubrió, al pesar el escarabajo antes y después de que realizará la recolección de niebla, un aumento de más del 30% del total de su peso (Brown *et al.*, 2016). De algunos de los estudios que se han realizado inspirados en el funcionamiento de estos escarabajos se puede destacar: la deposición por plasma

de polímeros hidrofílicos en sustratos de polímeros superhidrofóbicos, descubriendo que sí se utilizan "bultos" con diámetros menores a 400 micrómetros las gotas de agua no son capaces de crecer al tamaño suficiente para que su peso sobrepase la tensión superficial (Garrod *et.al.* 2007).

Zhu y Guo, desarrollaron bajo este mismo principio una superficie superhidrofóbica híbrida que tiene una tasa de recolección de agua (WCR) por sus siglas en inglés, de 1309,9 mg cm⁻² h⁻¹, que además muestran propiedades de auto-limpieza y excelente robustez. Wang realizó un dispositivo de recolección de niebla que consiste en una malla de cable de cobre, la cual es prensada a una lámina caliente de poliestireno. Para hacer de la malla un material superhidrofóbico, se calcinó la misma para crear un óxido de cobre y se combinó con un tratamiento de tiol fluorado. Como resultado se obtuvo una tasa de recolección de 160 mg cm⁻² h⁻¹.

2.2.1.2. Lagartijas

En algunos desiertos se encuentran distintas especies de lagartijas que son conocidas por su capacidad de recolectar agua del ambiente. Entre ellas se encuentran las especies: *Phrynosoma cornutum* (Texas), *Moloch horridus* (Australia) y *Phrynocephalus* (regiones áridas de Asia). Se han determinado como "lagartijas recolectoras de humedad", dada su alta capacidad de racionalizar el agua adquirida por diferentes fuentes. La queratina de su piel es hidrofílica y está compuesta por microestructuras hexagonales con tamaños entre 10 y 30 micrómetros. Una vez que el agua entra en contacto con pequeñas cantidades de agua estas microestructuras se llenan y hacen que la superficie de la piel se vuelva súper hidrofóbica, este proceso se conoce como premojado (Figura 2.5b) y se creó que funciona como una preparación para una absorción más eficiente de otras fuentes de agua, como la arena húmeda (Commans, 2018).

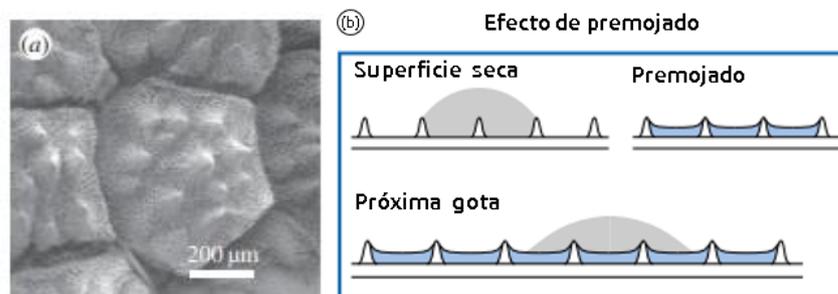


Figura 2.5 a) Micromorfología de la queratina de la *Moloch horridus* MEB. Fuente: Commans, 2017 b) Efecto de premojado sobre la queratina de la piel de las lagartijas recolectoras de humedad. Modificado de (Commans, 2018)

Para poder transportar el agua recolectada las lagartijas utilizan el transporte capilar. Su piel está compuesta por una red de canales que se extiende a lo largo de toda la superficie de su

cuerpo, donde las fuerzas capilares dominan sobre otras como la viscosidad, la fricción y la fuerza gravitacional. Dichos canales tienen un ancho entre 100 - 300 μm en su base y aberturas más angostas (menores a 50 μm) al acercarse a la superficie. Existe una serie de canales individuales más estrechos que se dirigen directamente a la boca de la lagartija, los cuales tienen ensanchamientos abruptos al pasar de un canal a otro, además de canales interconectados laterales que contrarrestan los efectos de los ensanchamientos y ayudan al avance del líquido (Commans, 2018).

Se puede decir que los canales están estructurados de una manera jerárquica donde hay una división de los canales largos a subcanales más pequeños, lo que puede ser el resultado de una adaptación morfológica de estas especies. Los canales largos son capaces de absorber el agua rápidamente para que, entre un alto volumen al sistema, seguidamente los subcanales que están formados por protuberancias dentro de las cavidades más largas, aparentemente funcionan como extensores de distancia para la distribución del agua (Commans *et al.*, 2017).

2.2.1.3. Telas de Araña

Las telas de araña tienen grandes características mecánicas, sus fibras están hechas con un material compuesto por una cadena de proteínas que le permiten superar el rendimiento de muchos materiales sintéticos, en cuestiones de elasticidad y fuerza. Además de eso, cuentan con una gran capacidad de recolección de agua. Mediante un mecanismo que permite a las fibras secas reorganizarse estructuralmente al entrar en contacto con la humedad (Brown *et al.*, 2016). Las proteínas tienen una naturaleza higroscópica, que permite la condensación de las gotas de una manera más eficiente y además produce un efecto de hinchazón en el hilo cilíndrico de la tela, el cual se rompe por la inestabilidad de Rayleigh. El fluido del cilindro se divide en gotas más pequeñas al buscar disminuir su área superficial, resultando una estructura similar a la de un "Rosario", es decir con una serie de nudos espaciados periódicamente como se observa en la figura 2.6a. Esto beneficia a las arañas tanto para la toma de agua como para la captura de las presas, dado a que se mejoran las propiedades adhesivas de los nudos al hincharse por el agua (Zheng *et al.*, 2010).

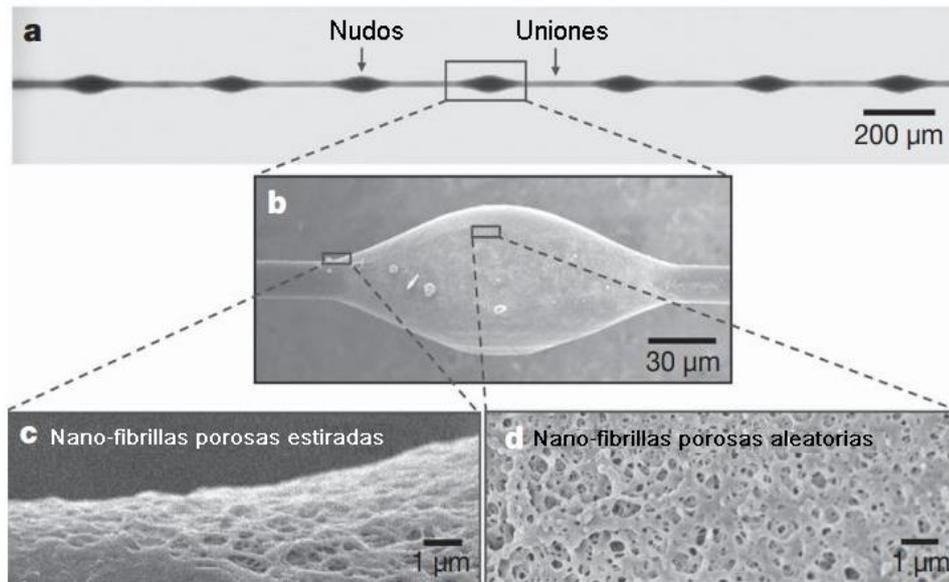


Figura 2.6. Seda de araña artificial que imita la estructura y la capacidad de recolección de agua de la seda de araña natural. (a) Imagen óptica de la estructura de nudo/unión con una periodicidad de $394,6 \pm 16,1 \mu\text{m}$. (b) micrografía de barrido de un nudo, (c) una estructura porosa estirada en la unión (d) y una estructura porosa aleatoria en el nudo. Modificada de: Zheng *et.al.* 2010

Se ha utilizado microscopía de barrido (MEB), para analizar la estructura de la tela de araña. De las imágenes resultantes, se destacó que los nudos estaban compuestos por nano-fibrillas porosas ubicadas al azar (Figura 2.6d). Por otra parte, las uniones entre la misma tela de araña estaban compuestas por nano-fibrillas porosas estiradas, las cuales estaban alineadas paralelamente al hilo, tal como se muestra en la figura 2.6c. Se pudo observar que las gotas que se condensaban en las uniones migraban a los nudos por dos razones: la primera se debe a una diferencia en la tensión superficial en los nudos, ya que éstos tienen una superficie más rugosa lo cual mejora la hidrofiliidad conforme las gotas entran al estado de Wenzel (i.e. Es el estado donde un líquido sobre una superficie ingresa a la misma por pequeñas ranuras, resultando una mayor mojabilidad por el aumento del área de contacto, según Murakami *et.al.* 2010). La segunda razón corresponde a la diferencia de presiones de Laplace, debido a que el radio de curvatura de los nudos es más pequeño que el de las articulaciones.

Al aplicar los principios que rigen estas telas de araña en la fabricación de materiales sintéticos, se ha utilizado la inestabilidad de Rayleigh para conformar su estructura. Para ello se ha identificado que un juego entre polímeros y solventes pueden lograr una simulación aproximada. Por ejemplo, se han fabricado fibras de nylon sumergidas en un poli (metacrilato de metilo) (PMMA). Las cuales después de ser sumergidas y removidas del solvente, sobre la fibra queda una pequeña y delgada capa cilíndrica de la solución. Esto conduce a que espontáneamente,

la fibra cambie su estructura en nudos espaciados regulares, por la inestabilidad de Rayleigh. Seguidamente las fibras fueron tratadas por una segunda solución de polímeros (PVAc/PS/PVDF) para modificar la composición química y la rugosidad de los nudos, con el propósito de provocar un cambio en los niveles de aspereza y las energías superficiales de los nudos con respecto a las uniones (Figura 2.7). Para poder aplicar el mismo principio de que las gotas de agua migrarán de los nudos a las uniones, se descubrió que al tener nudos hidrofóbicos ásperos, este fenómeno sucedía debido a que la resistencia a la histéresis evita que la gota siga la diferencia de energía superficial (que provocaría un movimiento en el sentido contrario) y que fuese la diferencia de fuerzas de presión de Laplace quien rigiera el movimiento de las gotas en el sentido deseado (Bai *et.al.* 2010).

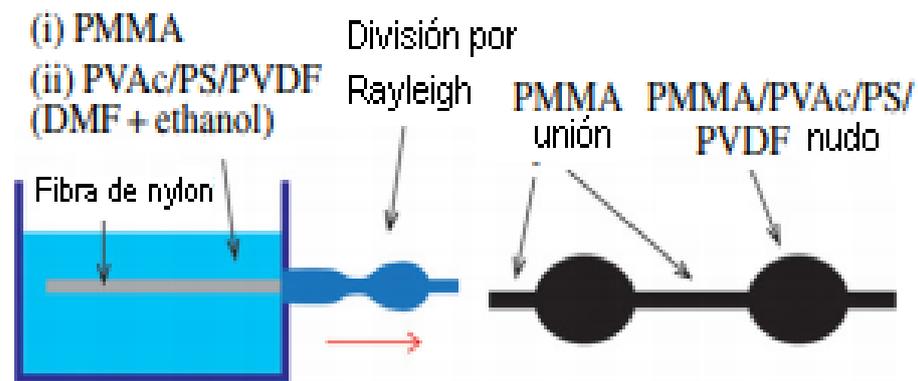


Figura 2.7: Técnica para la creación de tela de araña sintética, basada en la inestabilidad de Rayleigh, empleando polímeros recubiertos por inmersión con diversas sustancias químicas y asperezas. Modificado de: Bai *et.al.* 2010

2.2.2. Colectores bioinspirados en plantas

2.2.2.1. Cactus (*Opuntia microdasys*)

La forma y distribución de las espinas de los cactus han sido de gran inspiración para colectores de neblina. La figura 2.9 muestra un gloquidio del cactus *Opuntia microdasys*, nativo de México, recolectando neblina. Los gloquidios son un grupo de espinas foliares delgadas y cortas. En la figura 2.8 se puede apreciar la espina foliar de cerca, esta se compone de numerosas barbas retoras, lo que permite una eficiente recolección de neblina. Las gotas de agua se depositan sobre la punta de las barbas, y se mueven hacia la base de ellas, donde son recolectadas por la espina foliar y fluyen hacia su base. Finalmente, llegan a los tricomas, estos son los filamentos de color morado en la figura 2.8 y 2.9, que se encargan de absorber el agua.

El movimiento de la gota hacia la base de la espina es generado por la fuerza de presión de Laplace o fuerza de curvatura. Esta presión se da a causa de la tensión y la curvatura de la superficie. En la punta de una espina cónica hay mayor presión de Laplace por tener un radio de curvatura pequeño, y en la base de la espina hay menos presión por tener un mayor radio de curvatura. La espina tiene una gradiente de presión de Laplace de la punta a la base, lo que causa que la gota se desplace hacia la zona con menos presión.

La espina foliar también está compuesta de múltiples niveles de microondas. La base se compone de microondas mucho más dispersas que en la punta. Lo que impulsa la gota hacia la base, ya que el agua va a buscar el área de mayor superficie libre para desplazarse (Ju *et al.*, 2012).

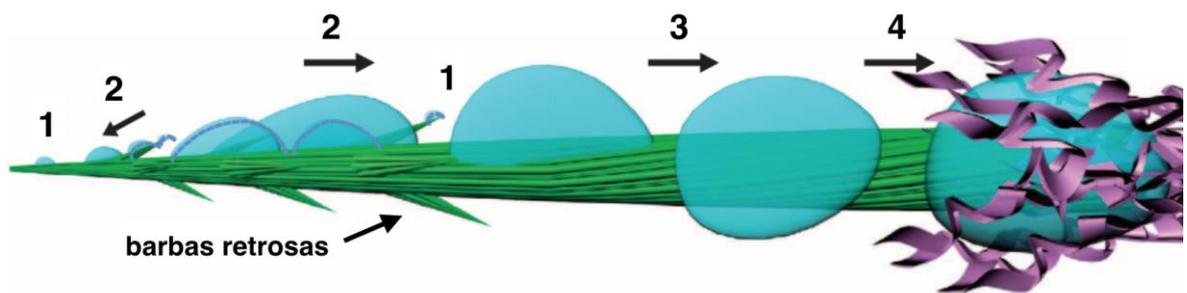


Figura 2.8. Mecanismo de colección de neblina de la espina foliar del cactus *Opuntia microdasys*: (1) deposición de la gota en las barbas, (2) recolección de la gota hacia la espina, (3) desplazamiento de la gota por causa de la gradiente Laplace y de mojabilidad hacia la base y (4) absorción de la gota al entrar en contacto con los tricomas. Modificado de Ju *et al.*, 2012

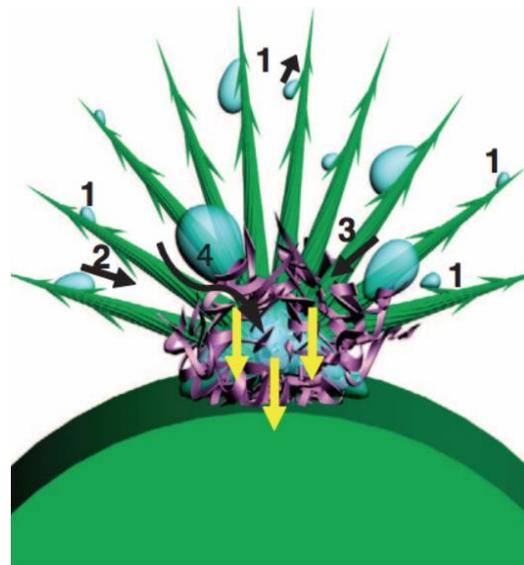


Figura.2.9. Mecanismo de colección de neblina en el gloquidio del cactus *Opuntia microdasys*: Cooperación entre las múltiples espinas foliares de gloquidia y los múltiples tricomas. La gota de agua va de: (1) deposición, (2) recolección, (3) desplazamiento y (4) absorción. Fuente: Ju *et al.*, 2012

Basado en las características de la superficie de las espinas de este cactus los químicos Jie Ju y Hao Bai crearon un alambre de cobre con forma cónica. El alambre fue alterado químicamente para tener un gradiente de mojabilidad, con punta hidrofóbica y base hidrofílica para imitar el efecto que tienen los diferentes niveles de microondas en la espina foliar. La combinación de la gradiente por Laplace, debido a la forma del alambre, y la gradiente de mojabilidad garantiza que la gota se desplace rápidamente hacia la base para ser absorbida. Esto permite que el ciclo de recolección de agua sea más rápido, que en un alambre cónico totalmente hidrofóbico o hidrofílico porque evita la acumulación de gotas (Ju *et al.*, 2013).

Los mismos profesionales en otro estudio evidenciaron que la distribución pareja de las espinas en el cactus *Opuntia microdasys* influye en la eficiencia de recolección de agua. Los científicos experimentaron diferentes distribuciones de una serie de conos, para encontrar la que permite desplazar el agua más rápida y eficientemente hacia un punto de recolección. En la siguiente figura se presentan las diferentes distribuciones puestas a prueba. La distribución a la derecha es hexagonal y la otra es tetragonal. Como resultado, las gotas de agua en la distribución hexagonal (A) se desplazaron a mayor velocidad que en la distribución tetragonal (B).

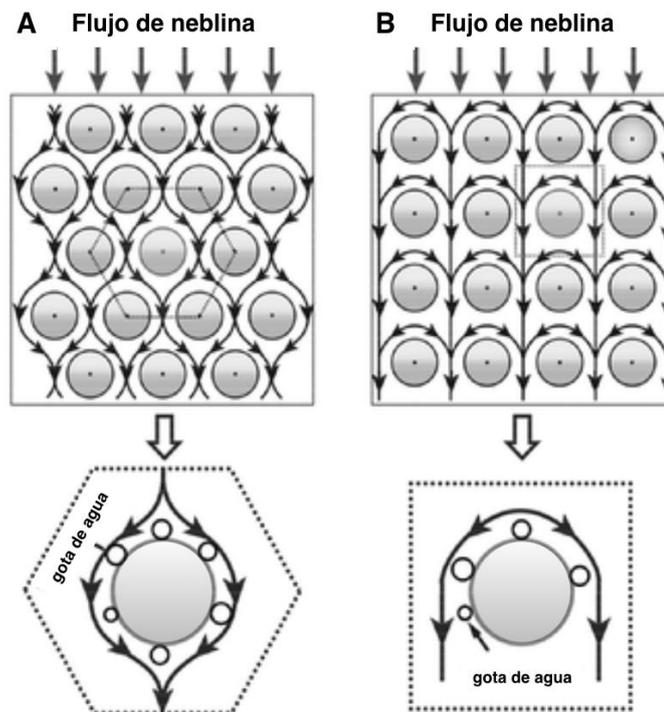


Figura 2.10 Superficie colectora de neblina con conos en distribución hexagonal (A) y distribución tetragonal (B). Fuente: Ju *et al.*, 2014. Editado a español.

La distribución hexagonal permite que las gotas de agua se depositen alrededor de todo el cono, en caso contrario la distribución tetragonal deja un vacío en el lado contra viento del cono. El tener una mayor área de deposición de gotas permite mayor recolección de neblina. Esto también permite que los ciclos de recolección de neblina se regeneren más rápido. Debido a que las gotas tienen más espacio donde desplazarse, fluyen más rápido, lo que evita acumulaciones en la base de los conos por falta de espacio libre (Ju *et al.*, 2014).

2.2.2.2. Bromelia (*Tillandsia* sp.)

A diferencia del cactus que utiliza sus espinas como medio de recolección, la Bromelia *Tillandsia* sp. recolecta humedad del aire directamente con sus tricomas que cubren toda la superficie de la hoja. Estos se encargan tanto de la recolección como de la absorción del agua. El tricoma de la *Tillandsia* sp. sale del estoma de la hoja y se expande radialmente hacia afuera, de manera que el agua recolectada en su superficie va directo al estoma.

Con la inspiración en ambas especies recolectoras de agua del aire, los ingenieros en materiales Barbara T.W. Ang, Junmin Xue, entre otros, diseñaron una superficie recolectora de agua con el propósito de obtener mayor coalescencia entre las gotas de agua y poder recolectar más agua en menos tiempo. La figura 2.11 es de una simulación de una de las cavidades de la superficie diseñada y su proceso de recolección de gotas de agua. La superficie se compone de una serie de cavidades circulares de borde filoso acomodadas hexagonalmente. El borde filoso imita la función de la espina del cactus, proporciona un espacio donde el agua se condensa. Las gotas se forman en el borde y se van uniendo hasta caer por gravedad sobre la cavidad circular rodeada. Esta imita la estructura del tricoma y funciona como reserva para las gotas que se van acumulando, promoviendo así mayor fusión entre ellas.

Una vez que la gota (formada por múltiples pequeñas gotas acumuladas) sea del tamaño de la cavidad, la gravedad va a superar la fuerza de adhesión de la gota a la estructura de la superficie y se va a desplazar fuera de la cavidad hacia un canal de recolección de agua. Además, la gota al fluir a través de los valles de la superficie puede pasar sobre otras cavidades, ayudando así a extraer rápidamente otras gotas acumuladas. La distribución hexagonal facilita la canalización de las gotas a través de los valles (Ang *et al.*, 2018).

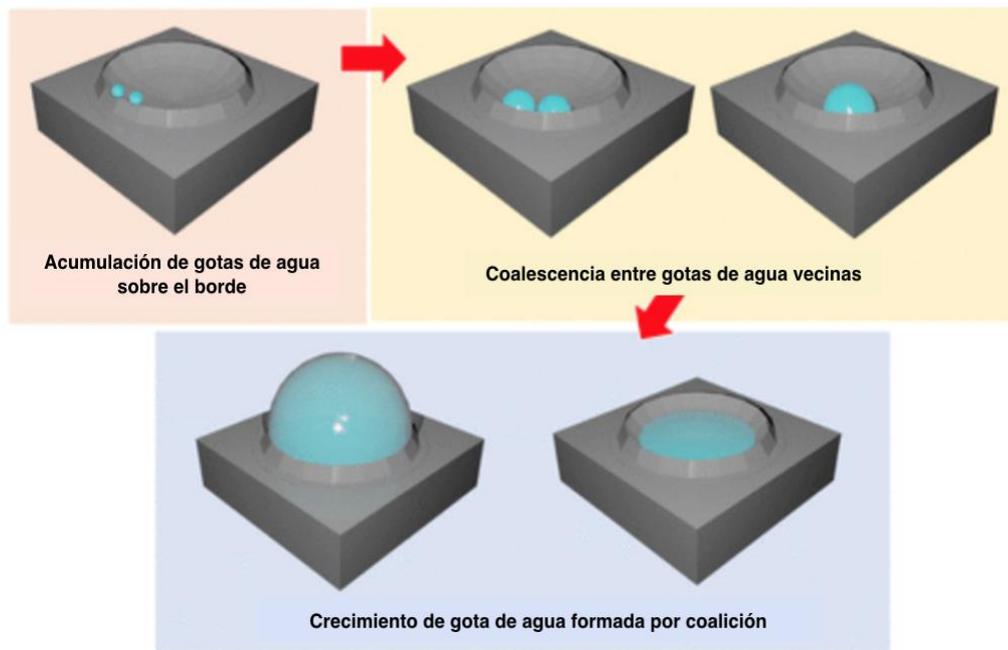


Figura 2.11. Simulación del mecanismo de recolección de agua de la superficie bioinspirada Fuente: Ang *et al.*, 2018. Editado a español.

La superficie original está hecha de polidimetilsiloxano o mejor conocido por sus siglas PDMS, un material hidrofóbico que promueve la condensación de agua ya que también posee capacidades para rechazar calor. Entre las cualidades del material y la estructura de la superficie se cumple el propósito de una recolección de agua con mayor generación de gotas y coalición entre ellas, obteniendo así un procedimiento más rápido de recolección (Ang *et al.*, 2018).

En el siguiente cuadro se da un resumen de otras especies con capacidades similares a las mencionadas para absorber agua. Estas también han sido inspiración para mejorar las superficies colectoras de neblina.

Cuadro 2.1. Especies de plantas para bioinspiración en colectores de neblina

Especie	Imagen	Mecanismo de obtención de agua	Fuente
<i>Stipagrostis sabulicola</i>		Las gotas de agua son canalizadas a través de las hojas hidrofílicas, su estructura microscópica permite guiar la gota hacia la base de la planta para llegar a las raíces.	(Chen, K., 2016)

<p><i>Cotula fallax</i></p>		<p>Las gotas de agua crecen en pequeños filamentos, cuando crecen lo suficiente el aumento en el peso permite que se desplacen por gravedad a través de la planta hasta llegar a las raíces.</p>	<p>(Domen, J. <i>et al.</i>, 2013)</p>
<p><i>Setaria Viridis</i></p>		<p>Su mecanismo de capturar y transportar gotas de agua es similar al del Opuntia microdasys. A diferencia que este tiene pequeñas barbas sobre sus espinas, en dirección a la punta de la espina (no retrosas). Este también contiene microondas que permiten el desplazamiento de la hoja desde la punta de las micro barbas hacia la base de la planta.</p>	<p>(Xue, Y. <i>et al.</i>, 2014)</p>

2.3. Morfología y fisiología de las Bromelias *Tillandsia* sp.

Las bromelias son un grupo de plantas con un amplio rango morfológico y fisiológico de estrategias para el uso y la recolección del agua, por lo que esta familia se puede encontrar en todo tipo de hábitat, desde el más árido al más húmedo, según define Reyes *et al.* 2008. Entre estas grandes variedades, existe el género *Tillandsia* que ha sido producto de varios estudios, ya que dentro de este género existen una gran cantidad de especies epífitas, es decir son capaces de captar los nutrientes y el agua del aire (Benzing *et al.* 1976).

Entre las adaptaciones evolutivas más destacables de las bromelias epífitas, se habla del cambio en el uso de “tanques”, los cuales funcionan como reservorios de agua, llamados así por la morfología que presentan las bases de sus hojas superpuestas (Ej. las bromelias que dan como fruto la piña). También las que pueden capturar los recursos por medio de tricomas capaces de absorber agua (Pierce *et al.* 2001). A pesar de que la mayoría de las bromelias cuentan con cierto tipo de tricomas, son las caracterizadas como “atmosféricas”, las que poseen esta dependencia al uso de estos de una forma más marcada, permitiendo el desarrollo de esta planta en zonas más áridas o en el dosel forestal (i.e. parte alta del bosque) (Reyes *et al.* 2008). Las raíces de estas especies normalmente viven por un corto periodo de tiempo y no tienen en su anatomía,

adaptaciones para retener agua, por lo contrario, su función se limita a la sujeción de la planta. (Papini *et al.* 2010)

Para tener una mejor comprensión de los mecanismos de absorción de agua de las Bromelias, en este capítulo se detalla el funcionamiento de los tricomas foliares, así como el trabajo celular para la distribución del agua, una vez recolectada. También se detallarán dos especies de Bromelias (*T.usneoides* y *T.schiedeana*), para detallar su morfología, que servirá como base para el diseño de las mallas de captación.

2.3.1. Tricomas foliares

El tricoma foliar es el mayor órgano de absorción de humedad en las bromelias. Estos son abultamientos sobre la epidermis que cuidan a la misma de roces, de la luz y se encargan de absorber el agua y los nutrientes del ambiente (Stefano *et al.*, 2008). Son estructuras multicelulares que tienen forma de escamas peltadas y se desarrollan sobre la superficie de las hojas.

Los tricomas de las *Tillandsia* sp. están compuestos principalmente por dos capas principales: la primera es la capa protectora (shield) la cual está formada por numerosas células ubicadas en la epidermis, se compone por las células del disco central, las células del anillo y las alas, figura 2.12 Por otra parte, la segunda capa es conocida como el tallo (stalk), que está compuesta por células vivas llamadas células del domo y células del pie, se encuentra profundamente en la epidermis, por lo que las células del pie están en contacto directo con el mesófilo, como se puede observar en la figura 2.13 (Stefano *et al.*, 2008).

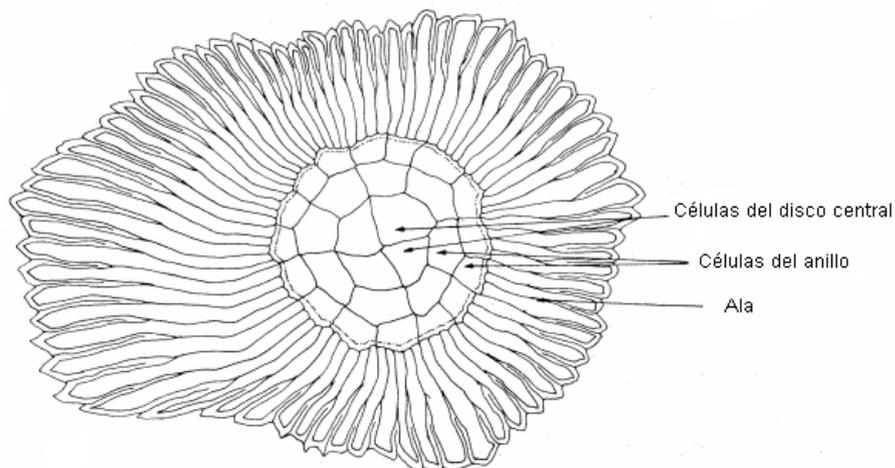


Figura 2.12. Representación de la vista superior de la capa protectora (shield) del tricoma de las bromelias *Tillandsias* sp. Fuente: Benzing *et al.*, 1976

El mecanismo de absorción se puede describir de la siguiente forma: cuando el tricoma está seco las llamadas “alas” permanecen erectas como se puede observar en la parte superior de la 2.13 dejando expuesta la superficie de la hoja subyacente y la parte inferior del tricoma, para que se humedezca con el agua proveniente de la lluvia, el rocío o la niebla (Pierce *et al.*, 2007). Cuando el ala se encuentra en esta posición le da a la hoja un color grisáceo (Stefano, *et.al.* 2008). El agua entra al tricoma por la parte inferior de la capa protectora, como se puede observar en la parte inferior de la imagen 2.13, donde se indica con la flecha la “ruta de entrada de agua”. Este es un espacio vacío, donde la célula carece de cutícula. Una vez que el agua entra, las células del disco central se hinchan, provocando un aumento de presión en las células contiguas, las del “anillo”, las cuales, al también hincharse, ejercen una fuerza a la base del “ala”, para que esta se aplane evitando la salida del agua (Pierce, *et.al.* 2007). Cuando las alas descienden y se adhieren nuevamente a la superficie de la hoja, esta recupera su color verde (Stefano, *et.al.* 2008).

Este mecanismo promueve la absorción al mejorar el movimiento por capilaridad del agua hacia las células del disco central. Cuando el entorno es muy húmedo ellas se inflan por encima de la epidermis, aumentando su porosidad, lo que permite mayor flujo de agua líquida hacia la parte interna del tricoma. Luego, cuando el entorno es seco, esta se hunde hacia las células vivas, bloqueando la salida del vapor de agua (Kulasinski *et.al.* 2015). En la figura 2.13 también se muestra el cambio físico de las células centrales, en donde en la parte A, se representa el tricoma con las células del disco central hundidas al haber ausencia de agua y en la parte B, se muestra cuando las células centrales se inflan al estar en contacto con la misma (Sahagún *et al.*, 2017). Se podría decir que funcionan como una válvula inteligente para el tricoma, en donde puede variar su posición dependiendo de las condiciones externas y necesidades de la planta.

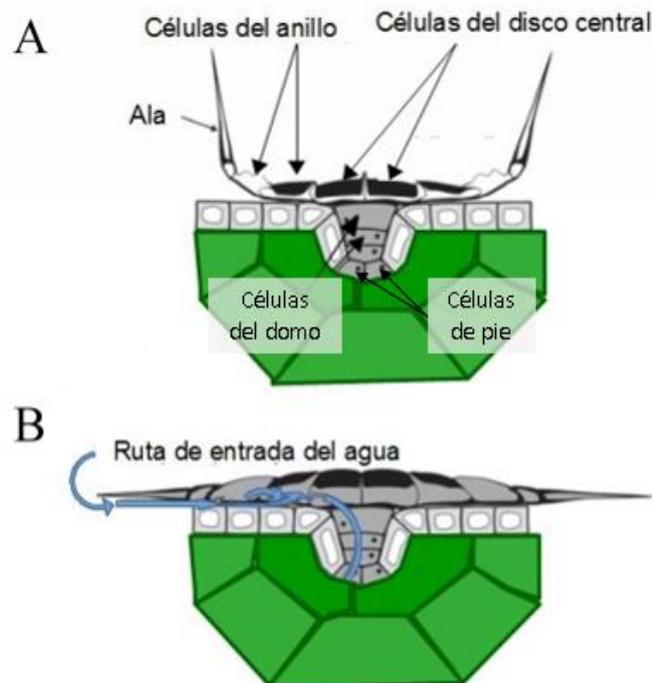


Figura 2.13. Representación de la vista transversal del tricoma foliar de la bromelia *Tillandsia* sp., presentación de la morfología al estar seca y húmeda. Modificada de (Sahagún, *et.al.* 2017).

Una vez que el agua es absorbida de la atmósfera por medio de las células de la capa protectora, el diseño del tricoma obliga al agua a moverse a lo largo de tres elementos sucesivos antes de entrar al mesófilo. El agua se mueve a través de las paredes gruesas de la capa protectora, el lumen de la célula del domo (i.e. espacio interno de la estructura celular) y por último la membrana semipermeable más externa de la célula del pie. Cuando la planta se encuentra expuesta a agua de neblina o de rocío, la alta higroscopicidad de las paredes de la capa protectora, permiten absorber las gotas por capilaridad permitiendo así un camino continuo del agua desde la superficie del hasta el citoplasma de las células del pie; el flujo es conducido internamente por el gradiente osmótico (Raux, *et.al.* 2020).

Entre algunas de las características que se han estudiado en los últimos años, se destaca que conforme la superficie de la hoja se seca, el disco central se sella, colapsando las células del domo y previniendo así que haya pérdida de agua por evaporación. También los tricomas secretan a nivel de la célula del domo, una especie de mucílago que permanece dentro del tricoma y aparentemente necesario para la absorción de agua (Papini 2010).

2.3.2. Especies de Bromelias *Tillandsia*

En la siguiente subsección se comentarán dos especies de *Tillandsia* que se encuentran en zonas de Costa Rica, según lo investigado en la literatura, estas especies son usualmente estudiadas para captación de agua. Se mencionan las especificaciones de su taxonomía, el hábitat donde se encuentran, las épocas de floración y fructificación y descripciones básicas de la especie.

a) *Tillandsia usneoides* (barba)

Taxonomía

La *T.usneoides* es una especie de bromelia cuya clasificación taxonómica indica que pertenece al reino Plantae, su filo es Magnoliophyta, de la clase Liliopsida, orden Bromeliales, de familia Bromeliaceae con género *Tillandsia* y subgénero *Diaphoranthema* (Hanan-Alipi *et al.*, 2009).

Hábitat

La *T.usneoides* se extiende desde el sur de Estados Unidos, hasta partes de Argentina. En Costa Rica se encuentra especialmente en el bosque húmedo, muy húmedo y pluvial. Específicamente de la Zona Norte en la Vertiente del Caribe, incluyendo San Carlos, Tortuguero, Cordillera de Talamanca y Baja Talamanca, Llanuras de los Guatusos, también se han identificado en la Cordillera de Tilarán, en la Central, en la Vertiente Pacífica, incluyendo Pacífico Central y la Península de Osa (Gómez *et al.*, 2008).

Fenología

Se ha registrado que su floración se da en el mes de diciembre. Por otra parte, se ha observado que su fructificación se da en los meses de marzo y diciembre (Gómez, *et al.*, 2008).

Características

Esta es una especie de *Tillandsia* del tipo epífita, se caracteriza por ser caulescente, es decir que tiene el tallo completamente desarrollado, que pueden llegar hasta los ocho metros, lo que permite hacer una distinción clara entre este y la raíz. Además, dichos tallos crecen colgándose de los árboles, lo hacen de manera acumulada en forma de masas fibrosas con distintas longitudes. Las hojas tienen dimensiones entre 3 y 6.5 cm, con espesores de 1 mm. La bráctea floral es ovada y los pétalos son angostos y de colores verdes o azules (Hanan-Alipi *et al.*, 2009).



Figura 2.14. *T.usneoides*. Fuente: Wikipedia, 2005

b) *Tillandsia schiedeana*

Taxonomía

La *T.schiedeana* es una especie de bromelia cuya clasificación taxonómica indica que pertenece al reino Plantae, su filo es Magnoliophyta, de la clase Liliopsida, orden Bromeliales, de familia Bromeliaceae, subfamilia Tillandsioideae con género *Tillandsia* y subgénero *Diaphoranthema* (Morales *et al.*, 2012).

Hábitat

Esta especie se encuentra desde México, hasta la parte norte de Suramérica, especialmente en Colombia y Venezuela. Normalmente se pueden encontrar en bosques secos deciduos o semideciduos y también húmedos. En el país abarca una gran parte del territorio nacional, se extiende en el Pacífico desde Guanacaste, pasando por el Pacífico Central y el valle de Tárcoles. En el Valle Central se puede encontrar en las zonas de Puriscal, Acosta, Valle de la Candelaria, Cartago y Turrialba. Además, en la parte sur del país, se ha observado en San Isidro del General y en el Valle del Térraba. Normalmente, a una elevación entre los 0 a 1500 m.s.n.m (Morales *et al.*, 2012).

Fenología

Se ha registrado que su floración se da desde febrero hasta mayo. Por otra parte, se ha observado que su fructificación cubre una gran época del año, esta va de mayo a enero (Morales *et al.*, 2012).

Características

Esta es una especie de *Tillandsia* también del tipo epífita y caulescente. Sus hojas tienen dimensiones que van de los 9 a los 35.5 centímetros. Sus brácteas florales tienen dimensiones de 1.5 a 3.6 cm y son de color verde-rojizas como se muestra en la siguiente figura. Comúnmente con inflorescencia de 1 a 7 flores (Morales *et al.*, 2012).



Figura 2.15. *T. schiedeana*. Fuente: Godman, 2004

2.4 Mojabilidad de texturas y materiales

2.4.1. Definición de mojabilidad según la teoría de Wenzel y Cassie-Baxter

La capacidad de absorción de agua en una planta va a depender tanto en el tamaño y forma de sus hojas como en su mojabilidad. Esta es una condición que determina la rapidez de un líquido en mojarse y derramarse sobre una superficie. Por medio de la nano y microestructura de la superficie de una hoja o junto con su composición química se logra obtener cierto grado de mojabilidad por el cual se logra absorber, canalizar, desplazar o repeler el agua según sea necesario.

La mojabilidad es un proceso en el cual el cambio de energía libre determina la espontaneidad con la cual la gota líquida se desenvuelve sobre una superficie. Esto define el tiempo y grado en el que la gota puede sobrepasar las fuerzas externas para esparcirse y desplazarse sobre ella. Durante este proceso hay tres superficies interfaciales, sólido-líquido, sólido-aire y líquido-aire, que se pueden interpretar como fuerzas de tensión superficial (Wenzel, 1936).

En la siguiente figura, se presenta una gota sobre una superficie lisa, los vectores representan las fuerzas que actúan sobre ella. En donde 'A' representa la tensión de adhesión, la cual equivale a la diferencia entre las tensiones superficiales de sólido-aire y sólido-líquido. En otras palabras, es la resistencia inicial a la mojabilidad. La tensión superficial del líquido con el aire se representa por 'S₂'. El ángulo de contacto entre la gota y la superficie se denomina 'θ'. Para que la gota se encuentre en estado de equilibrio se debe cumplir la siguiente relación:

$$A = S_2 \cos(\theta) \quad (2.3)$$

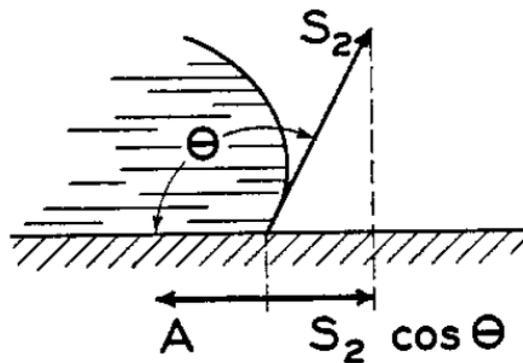


Figura 2.16. Relación vectorial entre fuerzas de tensión superficial para material liso. Fuente: Wenzel, 1936

No todas las superficies son perfectamente lisas, por lo que en casos reales se debe de tomar en cuenta la rugosidad de la superficie ya que esta puede amplificar la mojabilidad. Según el modelo establecido por *Wenzel* en 1936, la rugosidad va a afectar la tensión de adhesión, como lo muestra la figura 2.17, donde en este caso la fuerza actuando sobre la gota es 'rA' conocida como 'tensión efectiva de adhesión' donde 'r' es el factor de rugosidad. Este factor se obtiene con la relación entre la superficie actual (rugosa) y la superficie geométrica (superficie lisa con las mismas dimensiones y geometría).

$$r = \frac{\text{superficie rugosa}}{\text{superficie geométrica}} \quad (2.4)$$

En caso de una superficie lisa 'r' es igual a 1. Para una superficie rugosa se obtiene el ángulo de contacto por medio de la ecuación de estado de equilibrio de *Wenzel* para superficies rugosas:

$$rA = S_2 \cos(\theta') \quad (2.5)$$

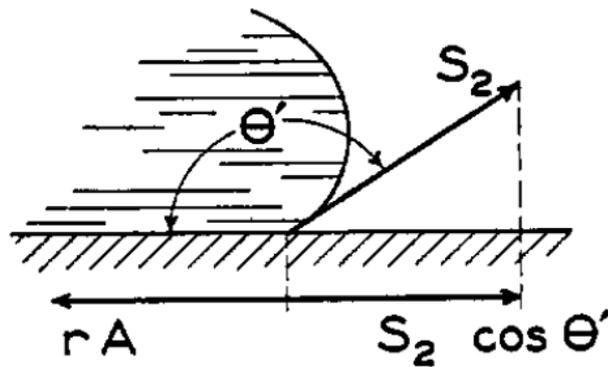


Figura 2.17. Relación vectorial entre fuerzas de tensión superficial para material rugoso. Fuente: Wenzel, 1936

Típicamente se utiliza el ángulo de contacto (θ) para definir el grado de mojabilidad entre la superficie y el líquido. El ángulo estático de contacto define la posición de la gota sobre la superficie cuando ésta se encuentra en estado de equilibrio. Entre mayor sea el ángulo de contacto menor va a ser la mojabilidad (Ahmad y Kan, 2016). Existen varias denominaciones de acorde al ángulo de contacto para describir el grado de mojabilidad en un sólido, las siguientes se presentan en la figura 2.18.

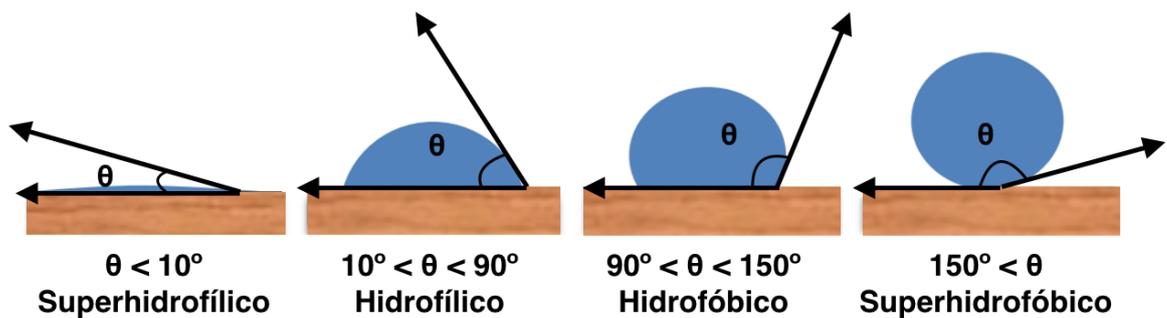


Figura 2.18. Caracterización de superficies por ángulo de contacto. Fuente: Elaboración Propia

Las superficies de alta mojabilidad permiten que la gota se absorba rápidamente ya que se esparce con mayor velocidad, lo que aumenta el área de contacto entre ella y el líquido. La gota en este caso se ve vencida por la fuerza de adhesión y de absorción en el sólido, por lo que encuentra su equilibrio a un ángulo de contacto menor a los 90° . Para estos casos se denomina la superficie como hidrofílica o superhidrofílica si el ángulo de contacto llega a ser inferior a los 10° .

Cuando hay baja mojabilidad la gota se mantiene casi esférica sobre la superficie dado que las fuerzas de tensión superficial que interactúan sobre ella no permiten su esparcimiento. Esta propiedad de hidrofobia se denota por la formación de ángulos de contacto superiores a 90° ,

al ser mayores a 150° se considera que es una gota superhidrofóbica. El modelo de Wenzel establece la teoría de que la gota de agua se esparce de manera homogénea sobre todas las hendiduras o microondas de la superficie rugosa, como se muestra en la figura 2.19c. Por lo que al aumentar la rugosidad se aumenta la mojabilidad de una superficie hidrofílica ($\theta < 90^\circ$) y se disminuye la mojabilidad de una superficie hidrofóbica ($\theta > 90^\circ$) (Wenzel, 1936).

En lo contrario, Cassie y Baxter establecen que puede haber casos en que el líquido no penetre las microondas, formando bolsas de aire entre las hendiduras y la gota (mostrado en la figura 2.19a). Lo que sugiere que no solo la rugosidad define la mojabilidad, sino también el área de contacto entre la gota de líquido y la superficie. Esto implica que al aumentar la rugosidad aumenta la hidrofobia de la superficie ya que hay menos área de contacto entre ambos estados (Ahmad y Kan, 2016). Si se aplicara presión externa a la gota se puede transicionar del estado Cassie-Baxter al estado Wenzel, como se muestra en la figura 2.19b. Ambos estados presentan casos ideales donde sucede uno o el otro, pero en la realidad es mucho más complejo ya que hay muchos factores externos e internos que influyen en la interacción sólido-líquido.

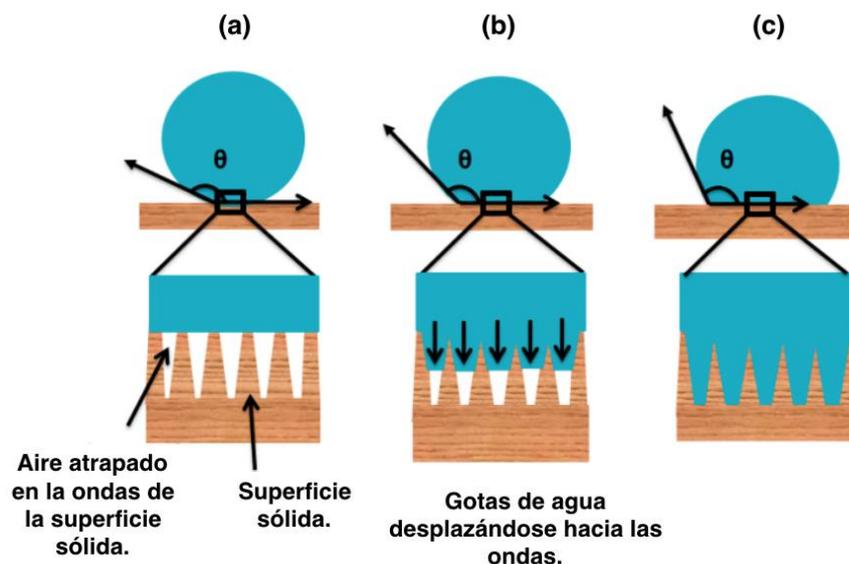


Figura 2.19. Ilustración de teorías de hidrofobicidad. (a) Gota de agua en superficie rugosa según Cassie y Baxter. (b) Estado de gota de agua entre modelo de Cassie-Baxter y de Wenzel. (c) Gota de agua en superficie rugosa según Wenzel. Modificado de Ahmad y Kan, 2016.

Por otra parte, el ángulo de contacto estático no es la mejor manera de definir la mojabilidad de una superficie ya que las fuerzas de adhesión y tensión superficial van cambiando con el tiempo, a medida que la gota crece o se desplaza en la superficie. Para tomar en cuenta esta variación se mide un rango de ángulos de contacto donde el ángulo de avance (θ_a) es el ángulo de contacto máximo durante la interacción de la gota y la superficie, y el ángulo de retroceso (θ_r)

es el ángulo mínimo de contacto. La diferencia entre ángulo de avance y el ángulo de retroceso, se conoce como la histéresis del ángulo de contacto (H), esta también define la mojabilidad de la superficie (Ahmad y Kan, 2016).

$$H = \theta_a - \theta_r \quad (2.6)$$

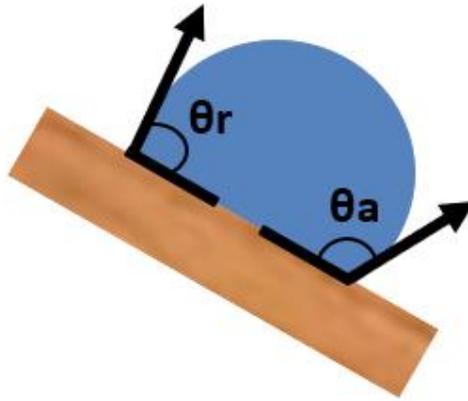


Figura 2.20. Ángulo de avance y de retroceso para histéresis del ángulo de contacto. Fuente: Elaboración Propia

Cuando se trata de agua, una histéresis alta significa que la superficie es hidrofílica. Si la histéresis da un valor cercano a cero indica que la superficie es hidrofóbica y si el valor es casi cero se puede denominar superhidrofóbica. En las superficies hidrofílicas la gota se esparce hacia la superficie, lo que causa un mayor cambio entre el ángulo de contacto inicial y final. En el caso de una superficie hidrofóbica la gota permanece casi estable sobre la superficie manteniéndose casi estática.

Cabe mencionar que para definir la mojabilidad de una superficie se recomienda conocer tanto el ángulo de contacto estático como la histéresis del ángulo de contacto. Aun así, los valores reales obtenidos no acostumbran a asemejarse a los valores teóricos que se pueden obtener por las ecuaciones previamente mencionadas por lo que siempre es necesario obtener valores experimentales para aproximarse al estado real de mojabilidad de una superficie.

2.4.2 Método de medición de ángulo de contacto (Gota Sésil)

Este método es el más común, y el primero en ser utilizado para estudiar la mojabilidad de las superficies. Se utiliza un goniómetro, instrumento diseñado por William Zisman en 1960, específicamente para la medición del ángulo de contacto. El siguiente es un telescopio dirigido a una platina donde se coloca la superficie. Se utiliza una micropipeta para colocar la gota sobre el material, de manera que queda de forma sésil sobre la superficie. El telescopio tiene incorporado un goniómetro para poder medir el ángulo mientras se observa la gota cerca. Se alinea el

goniómetro con la tangente del perfil de la gota con el punto de contacto de la superficie horizontal para obtener el ángulo. Para mayor exactitud en la medición se puede utilizar una cámara de alta resolución alineada con el telescopio para luego medir el ángulo de contacto en las imágenes (Thimmaiah *et al.*, 2018).

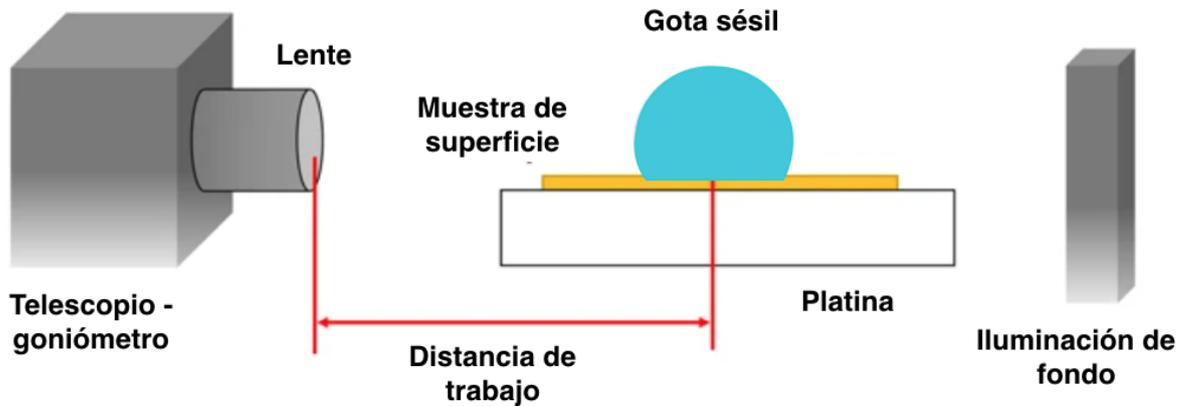


Figura 2.21. Montaje para medición de ángulo de contacto con goniómetro. Fuente: Thimmaiah *et al.*, 2018. Editado a español.

2.4.3 Superficies superhidrofóbicas en plantas

Con base a los estudios de Holloway en 1970, cuando investigó la estructura superficial de más de 200 especies de plantas hidrofóbicas, se ha concluido que la mayoría de estas plantas tienen una estructura jerárquica en su superficie. La epidermis de estas plantas se compone de células convexas hasta papilosas. Una célula se denomina papilosa cuando la parte central de la célula convexa sobresale de manera que forma una prominencia cónica, conocida como papila (Figura 2.22b).

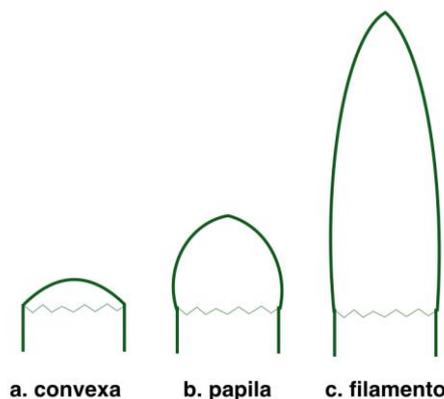


Figura 2.22. Geometría de células de diferentes tipos de células convexas. Modificado de Barthlott *et al.*, 2017

En el caso de las plantas hidrofóbicas todas las superficies tienen una cutícula sobre las células externas. La cutícula es una capa protectora sobre la epidermis compuesta de material

hidrófobo, para controlar la humedad en la superficie de la planta. En ciertas plantas la cutícula tiene integrado lípidos superpuestos conocidos como cristales de cera epicuticular. Los cristales aumentan la hidrofobia de la planta ya que además de liberar material hidrófobo, generan una estructura jerárquica en la epidermis, que disminuye la fuerza de absorción ejercida a las gotas de agua que se depositan sobre ella (Barthlott *et al.*, 2017).

La mojabilidad en estas superficies jerárquicas también disminuye, porque basado en la teoría de Cassie y Baxter, en una superficie rugosa se generan bolsas de aire en las cavidades formadas por el espacio libre entre las células convexas. Además, la superposición de los cristales de cera nano estructurales disminuye el contacto entre la gota líquida y la superficie sólida de la planta.

Existen otros arreglos estructurales en plantas hidrofóbicas menos comunes, por ejemplo, la hoja del repollo (*B. oleracea*) tiene células planas, pero una capa bastante densa de cristales de cera que causa la hidrofobia. Hay casos en que el centro de la célula convexa sobresale tanto que asemeja un filamento. La combinación de estas células con una capa de cristales de cera tridimensionales genera una superficie superhidrofóbica. Cuando la gota se deposita sobre los filamentos, estos se doblan un poco pero su rigidez no permite que la gota se desplace por entre los filamentos.

En la figura 2.23a y 2.23b se presentan estructuras jerárquicas de dos niveles de la hoja de lotus (*Nelumbo nucifera*) y de la *Euphorbia myrsinites*. El primer nivel está compuesto por las células convexas y el segundo por los cristales de cera en forma tubular y en placas respectivamente. La figura 2.23c-e muestra la estructura jerárquica de tres niveles de la *Salvinia oblongifolia*. Esta planta se conoce también como un helecho acuático ya que flota sobre el agua. Su estructura superhidrofóbica difiere del esto porque se compone de una estructura jerárquica de tres niveles. La superficie contiene varias células en forma de filamento (Figura 2.23c), también conocidos como tricomas de diferente morfología, pero todas de carácter hidrófobo. El primero y segundo nivel se forma por las células convexas cubiertas de los cristales de cera (Figura 2.23d y 2.23e). El tercer nivel se forma por las puntas de los tricomas que sobresalen de la superficie, como se muestra en la figura 2.23c (Koch y Barthlott, 2009).

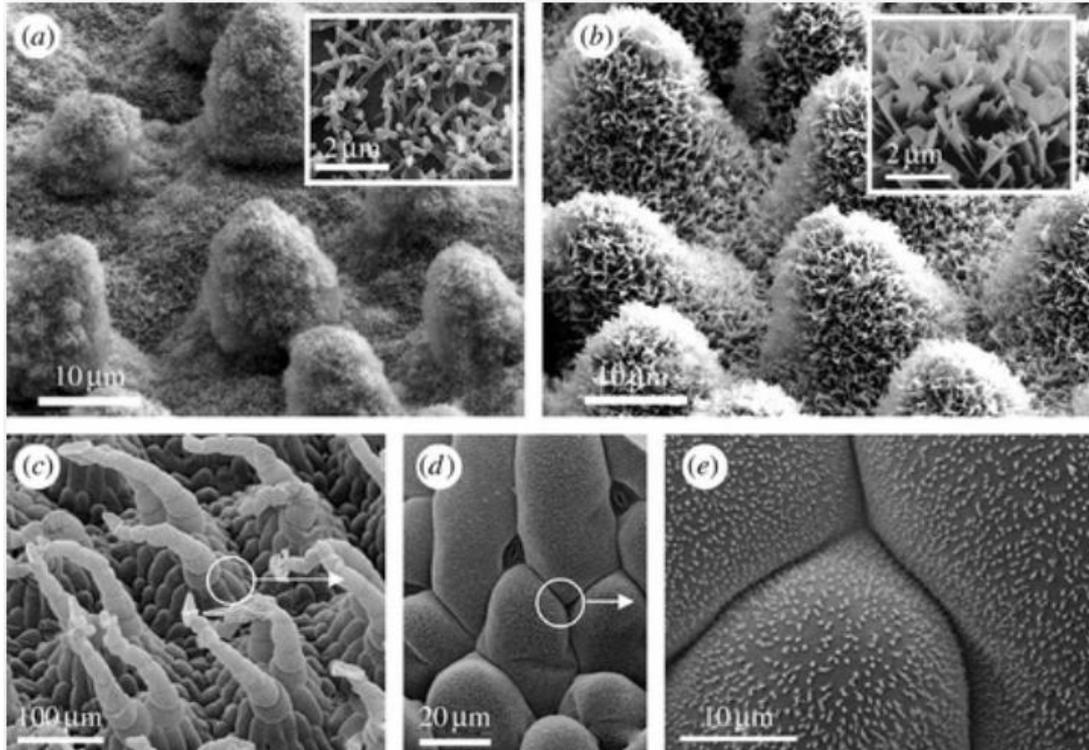


Figura 2.23. Micrografías de barrido de las estructuras de la epidermis de hojas de plantas superhidrofóbicas. (a) La hoja de *Nelumbo nucifera* y (b) *Euphorbia myrsinites* se componen de células convexas (papilosas) con nanoestructura de cristales de cera. (c-e) Estructura jerárquica de las células en forma de filamento de la *Salvinia oblongifolia* y los cristales de cera sobre ella. Fuente: Koch y Barthlott, 2009

2.4.4 Superficies superhidrofílica en plantas

Entre las plantas superhidrofílicas están las de superficie permanentemente mojada, y las que deben absorber agua desde la superficie y permitir que el agua se esparza a través de ella. Las plantas con superficie mojada son aquellas que nacen debajo del agua. Típicamente estas plantas tienen una epidermis compuesta de células planas sin cristales tridimensionales de cera en la cutícula. Un ejemplo de esta estructura se muestra en la figura 2.24a de la planta de agua *Anabius barteri*. A diferencia de las plantas hidrofóbicas, estas no crean una estructura jerárquica, ya que no se quiere interrumpir el desplazamiento del líquido en la superficie, por lo mismo estas no presentan rugosidades.

Las plantas que deben absorber agua de sus alrededores se componen generalmente de estructuras porosas. Los poros en una superficie se forman en la capa externa de las células de la epidermis, estos permiten la absorción rápida de agua proveniente de la neblina, rocío o lluvia. Hay varios tipos de musgo con superficie porosa, como por ejemplo la *Sphagnum squarrosum*, de la figura 2.24b, tiene poros de 10-20 μm de diámetro. Estos se forman por células muertas y con rupturas en su capa externa. Su apariencia se asemeja a la de una esponja. Otro tipo de musgo es el *Rhaocarpus purpurescens*, mostrado en la figura 2.24c posee poros mucho más pequeños de

0,2-0,1 μm . La imagen MEB muestra la superficie de una sola célula para mostrar la distribución reticular de los poros.

En el caso de la figura 2.24e se tiene una superficie bastante homogénea de células con forma de papilas representativa de la *Calathea zebrina*. Siempre con la ausencia de cera epicuticular, lo que genera una superficie superhidrofílica, en este caso la gota se deposita entre las cavidades de las células, en estado Wenzel.

La figura 2.24f muestra una superficie mucho más compleja que el resto, esta es de las hojas de la *Ruellia devosiana*. Es de las estructuras más interesantes ya que combina varios tipos de células para obtener mayor absorción de agua. Está compuesta de células en forma de papila y de filamento, glándulas que expulsan sustancias hidrofílicas e incluso canales formados entre las células papilosas y las planas. Esta estructura incluso logra que el agua se desplace contra la fuerza de gravedad a causa de succión capilar. El agua se puede esparcir horizontal y verticalmente a través de la hoja aumentando el área de contacto entre el agua y la hoja, lo que propicia mayor absorción (Koch y Barthlott, 2009).

Una estructura única en su especie es la de los tricomas absorbentes de agua de la *Tillandsia* sp. En la figura 2.24d se observa el tricoma foliar multicelular superhidrofílico de la *T.usneoides* compuesto por células muertas en forma radial, lo que permite mayor área de contacto con el agua, para aumentar la absorción. Esta especie tiene una capa densa de tricomas, donde el agua es canalizada entre los espacios formados por la superposición de estos (Herppich *et al.*, 2019).

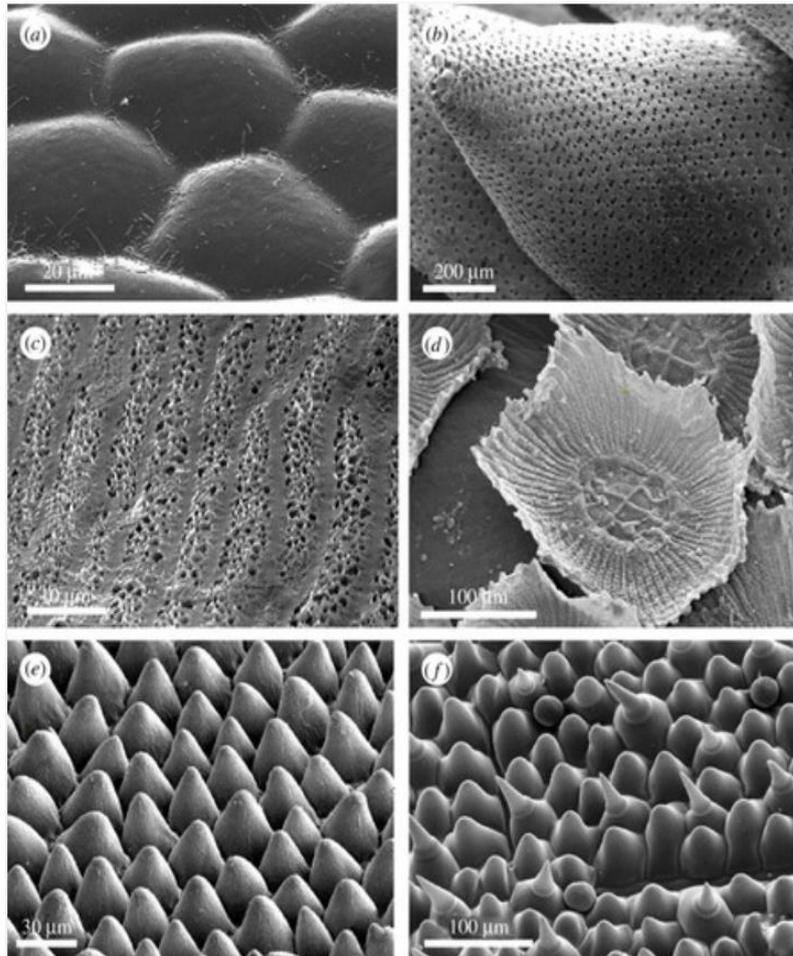


Figura 2.24. Micrografías electrónicas de barrido de estructuras de la epidermis de hojas de plantas superhidrofílicas. a) Superficie lisa de células planas, de la planta de agua *Anubias barteri*. b) Superficie porosa formada por células muertas de musgo (*Sphagnum squarrosum*). c) Superficie porosa del musgo *Rhacocarpus purpurescens*. d) Superficie compuesta de tricomas multicelulares de la especie epífita, (*T.usneoides*). e) Superficie uniforme de células cónicas de la hoja de *Calathea zebrina*. f) Composición de múltiples tipos de células de la hoja de *Ruellia devosiana*. Fuente: Koch y Barthlott, 2009

En el siguiente diagrama se resumen las posibles combinaciones de micro y nano estructuras en las superficies de las plantas hidrofóbicas e hidrofílicas, basado en los estudios de Wilhelm Barthlott.

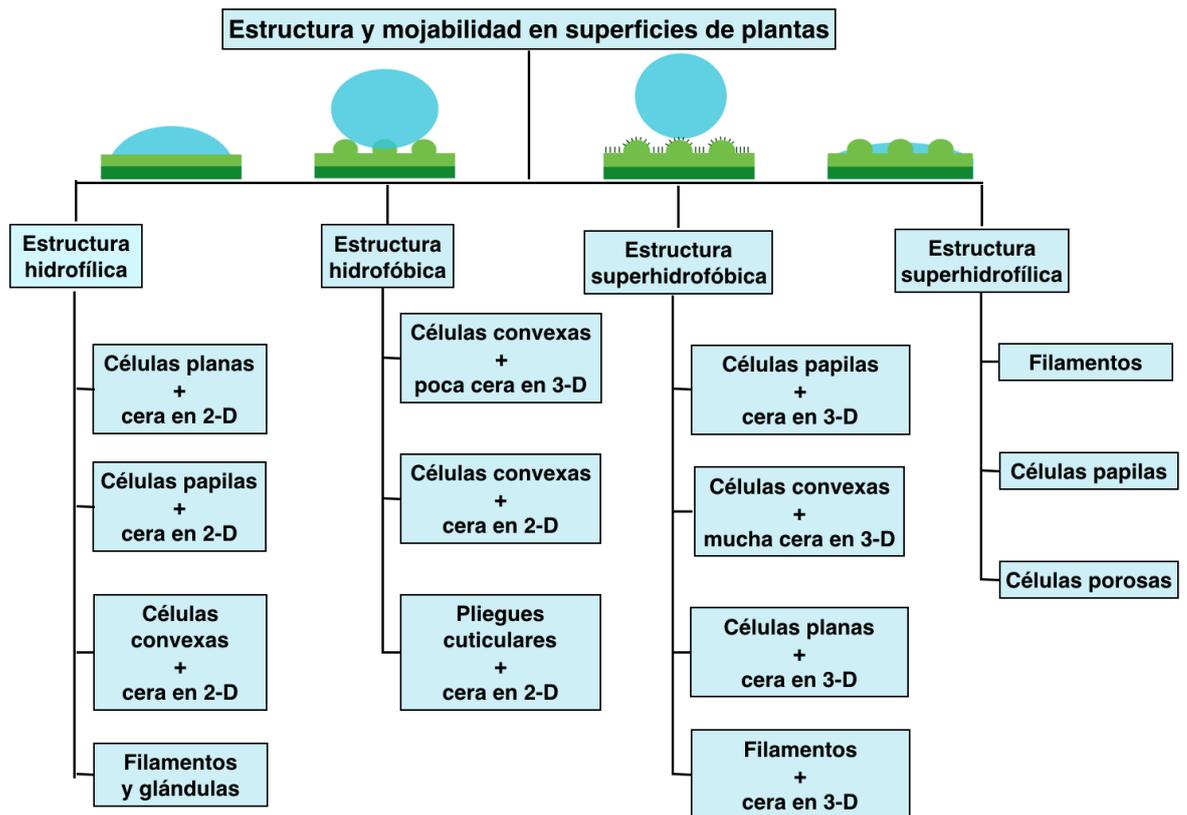


Figura 2.25. Diagrama de estructura típica encontrada en la epidermis de plantas basado en su mojabilidad. Modificado de Barthlott *et al.*, 2017

2.4.5 Superficies sintéticas superhidrofóbicas

Una de las técnicas más utilizadas para crear superficies hidrofóbicas es la fotolitografía, con esta se logra replicar patrones en una lámina delgada de material, logrando así crear una estructura jerárquica, e imitando el efecto de los cristales de cera en las plantas. Por ejemplo, fabricar una serie de nano-conos con una punta de apenas 10 nm de radio, en una lámina de fibra de vidrio. Se aplicó una solución de hidruro de silicio tratado con fluoruro, para cambiar la superficie de hidrofílica a hidrofóbica. Fue creado en 2004 por el doctor John Simpson y Brian D’Urso, la combinación del material y la nanoestructura resultó ser de las superficies más hidrofóbicas que aún se ha encontrado, con un ángulo de contacto mayor a los 179°. En la figura 2.26 se observa a la izquierda el arreglo de los conos y a la derecha la misma superficie rodeada de agua. Es tan hidrofóbica que aún rodeada de agua, esta no se moja, por lo que le llamaron el ‘efecto moisés’ (Simpson *et al.*, 2015).

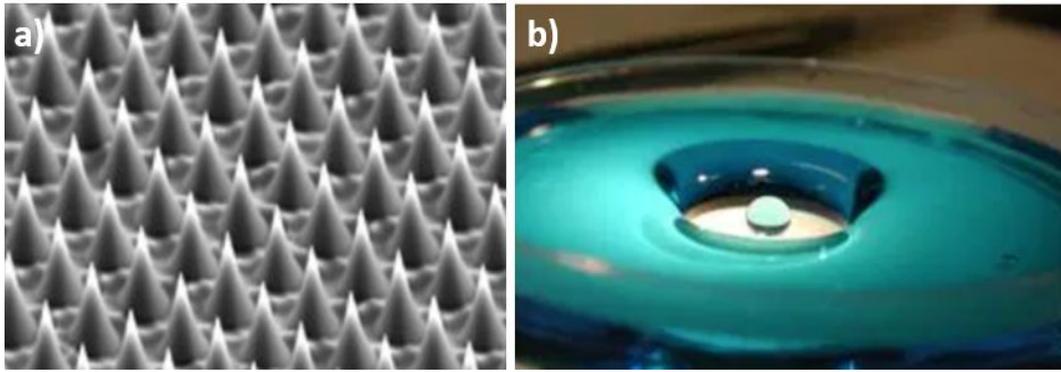


Figura 2.26. Superficies sintéticas superhidrofílicas: a) Serie de conos con altura de 12 μm con punta filosa de 10 nm de radio, hechos de fibra de vidrio. b) ‘Efecto moisés’ en disco de fibra de vidrio de 14 mm de diámetro con 1 millón de conos rodeado de agua. Modificado de Simpson *et al.*, 2015.

Dado a la naturaleza no polar del silicio se puede componer de varias maneras para generar capas hidrofóbicas, la más común es en forma de silicona. Típicamente se generan materiales hidrofóbicos cubriendo de silicona materiales como el poliéster convencional, textiles de poliéster y microfibras de poliéster. Con la rugosidad creada por la superposición entre las fibras de poliéster y las partículas de silicio agregadas resulta en una superficie hidrofóbica o inclusive superhidrofóbica (Koch y Barthlott, 2009).

2.4.6 Superficies sintéticas superhidrofílicas

Ciertos materiales sólidos obtienen su hidrofiliidad cuando las gotas se depositan en estado Wenzel sobre el sólido rugoso y cuando hay suficiente energía de superficie libre para que la gota se esparza. Se acostumbra a hacer materiales hidrofílicos por medio de revestimientos de materiales con moléculas polares, para formar enlaces con el agua. Por ejemplo, a las mallas colectoras de agua de acero inoxidable se le puede agregar un revestimiento de óxido de titanio u óxido de zinc mezclado con poliuretano a base de agua, para crear un compuesto con gran cantidad de grupos de hidroxilo, lo que aumenta la hidrofilia. Ya sea con óxido de titanio u con óxido de zinc, se puede obtener una malla con ángulo de contacto inferior a los 5° . Pero, la mejor opción es agregar al acero inoxidable nanopartículas de óxido de sílice ya que por su carácter desecante es capaz de absorber humedad, obteniendo un ángulo de contacto cercano a los 0° (Otitoji y Ahmad, 2017).

2.5 Diseño de mallas prototipo de recolección de agua

2.5.1 Diseño de las mallas de recolección

Para el desarrollo de la malla, es necesario contar con un método de fabricación que permita adaptar el diseño a proponer, con materiales que cuenten con características de hidrofobicidad e hidrofiliidad, para poder aplicar la mimética de las bromelias. Las bromelias tienen tricomas foliares multicelulares superhidrofílicos, que permiten aumentar el área de contacto con el agua y así aumentar la absorción. Además, también cuentan con las alas, las cuales se cierran para evitar la salida del agua, como se explicó en los capítulos anteriores; esto, se puede replicar con una combinación de mojabilidades.

Además, es necesario contar con materiales que sean resistentes a condiciones externas como lluvia, fuertes vientos, radiación ultravioleta, entre otros. La versatilidad en diseño y materiales que otorga la impresión 3D, la hace la opción más adecuada para la fabricación de la malla. Uniendo estas características y basándose en la disponibilidad de los materiales se escogió trabajar con ABS con fibra de carbono y silicón.

2.5.1 ABS con Fibra de Carbono

El ABS es un material ampliamente utilizado en la impresión 3D, además, es extensivamente empleado en la cotidianidad en la industria automovilística, comercial (recipientes) y en la eléctrica, esto debido a sus buenas propiedades mecánicas. Este material, además, ofrece formas muy sencillas de ser trabajado, la posibilidad de obtener figuras muy complejas, la capacidad de ser reciclado, altos valores de dureza, estabilidad dimensional y texturas superficiales buenas. (Li, *et.al.* 2019). Mediante la incorporación de la fibra de carbono, se ha estudiado cómo el material logra balancear la dureza con la rigidez, resultando como mejora en los valores de esfuerzos de tensión. Las características del filamento para impresión 3D son las siguientes:

Cuadro 2.2. Propiedades físicas del ABS con fibra de carbono para impresión 3D. Fuente: 3DXTECH

Propiedades físicas	Estándar	Unidad	Valor típico
Densidad	ISO 1183	g/cc	1,11
Propiedades Mecánicas	Estándar	Unidad	Valor típico
Esfuerzo de tensión, freno	ISO 527	MPa	46
Módulo de Tensión	ISO 527	MPa	5210
Elongación, al freno	ISO 527	%	2
Esfuerzo flexible	ISO 178	MPa	76
Módulo flexible	ISO 178	MPa	5260

2.5.2 Silicón

El silicón o polidimetilsiloxano (PDMS), que corresponde al polímero de silicón genérico, está disponible comercialmente y es química y físicamente muy estable. Tiene una flexibilidad muy alta con un módulo de elasticidad de la cortante de $G = 250 \text{ kPa}$, debido a ser uno de los polímeros con menores temperatura de transición vítreas de $T_g = -125^\circ\text{C}$. Este material, además tiene un bajo cambio en su módulo de elasticidad cortante, al estar expuesto a la temperatura: $1.1 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, lo que ayuda a estar expuesto a temperaturas externas.

El Silicón es un material repelente al agua. Además de las características de hidrofobicidad, tiene una excelente estabilidad oxidativa, que lo hace ideal para ambientes exteriores (Owen, 2014). Se ha demostrado además que las superficies de silicón se vuelven más hidrofóbicas al cambiar su superficie de lisa a alguna con patrones que sean contrarios al flujo de las gotas de agua, sin la necesidad de deposición de recubrimientos. El aumento de la hidrofobicidad al aumentar estos “patrones”, es un comportamiento que ocurre debido a las cavidades de aire que quedan atrapadas debajo del líquido, provocando que la penetración de la gota sea parcial (Zorba, *et.al* 2006).

Capítulo 3

Metodología

3.1 Selección de la especie de Bromelia

Para elegir el género *Tillandsia* de la bromelia que se va a analizar a nivel microestructural, se debe de determinar entre los 2 tipos escogidos la que posee mayor capacidad de absorción. Para ello se realizaron dos pruebas distintas, la primera consiste en sumergir completamente en agua las plantas, para determinar su capacidad de absorción en dadas condiciones y la segunda en exponerlas a un ambiente saturado en vapor de agua (con humedad relativa de 100%). Por medio de la diferencia de pesos antes y después de la prueba se puede obtener los porcentajes de absorción de agua para cada planta.

Ya que las condiciones a las que se van a exponer no representan el estado natural en el cual estas especies habitan, se espera que en poco tiempo tengan la capacidad de absorber grandes cantidades de agua, ya sea en la sumersión y en el ambiente altamente húmedo. Se hacen este tipo de pruebas en un ambiente totalmente controlado, debido a que en sus condiciones naturales puede haber varios factores que alteren su desempeño, lo que no permitiría una comparación de resultados precisa.

Basado en la accesibilidad geográfica y el estudio previo de los diferentes tipos de *Tillandsia* sp. se decidió llevar a cabo las siguientes pruebas en la *T.usneoides* y la *T.schiedeana*. Se obtuvieron dos muestras para cada tipo de planta. La recolección de las bromelias *T.usneoides* se realizó en Barrancas, de Tejar del Guarco, Costa Rica, esto sobre la calle Hacienda Tobosi que está rodeada de árboles al lado de la carretera, la cual es poco transitada. La recolección de la *T.scheideana* se realizó en dos árboles al lado de la Calle Boquerón en Guachipelín Escazú, en esta zona abundan este tipo de plantas. Para asegurarse que las muestras se encuentren en condiciones similares antes de las pruebas, estas fueron extraídas el mismo día el 5 de octubre del año 2020, y se colocaron sobre una toalla sin agregarles agua, o exponerlas a ambientes altamente húmedos.

A continuación, se presenta el protocolo para la primera prueba de absorción, denominada Prueba de sumersión de bromelias en agua. El propósito es obtener la masa de la planta seca y la masa de la planta luego de sumergirse por cierto periodo de tiempo, de manera que el aumento en la masa representa la cantidad de agua absorbida.

Cuadro 3.1. Protocolo para prueba de sumersión en agua de bromelias

PROTICOLO PARA PRUEBA DE SUMERSIÓN EN AGUA DE BROMELIAS		Fecha: 7/10/2020
DESCRIPCIÓN GENERAL		
Este protocolo se desarrolla para la prueba de sumersión completa en agua de las dos especies de bromelia <i>T.usneoides</i> y la <i>T.schideana</i> , para evaluar su capacidad de absorción.		
#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Cámara de acondicionamiento	Associated Environmental Systems Código 331542
1	Balanza analítica	AND Serie GR-202
1	Cronómetro	Teléfono celular (Iphone 8)
1	Envase con agua	Dos envases plásticos, espaciosos y no transparentes.
1	Alambre metálico	Alambre delgado y flexible para guindar las plantas.
1	Tela cobertora	Tela gruesa para cubrir envases de plástico.
2	Bromelias	Dos especies <i>T.usneoides</i> y dos de <i>T.schideana</i> .
PROCESO		
ETAPA 1: SECADO		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Pre-acondicionamiento de las bromelias	Encender la cámara de acondicionamiento y seleccionar una humedad relativa del 50%. Colocar las muestras en la cámara y esperar alrededor de 2 horas y 30 minutos para que se establezcan las condiciones de la cámara y se complete el secado de las muestras. Se recomienda estar supervisando el procedimiento, para determinar que la cámara

		de acondicionamiento se mantenga estable en 50%, durante el proceso de secado.
2	Peso de muestras secas	Una muestra a la vez se extrae de la cámara de acondicionamiento e inmediatamente se coloca sobre la balanza analítica. Se espera a que el peso se estabilice y se apunta el dato. Mientras se pesa una de las muestras, el resto debe permanecer en la cámara de acondicionamiento, con la puerta cerrada, para evitar que absorban humedad durante el tiempo de espera.
ETAPA 2: SUMERSIÓN COMPLETA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Sumersión completa en agua de las bromelias	Llenar los dos envases de plástico con suficiente agua. Suspender las muestras de <i>T.schiedeana</i> sobre el envase con el alambre metálico de manera que sus hojas se encuentren completamente sumergidas en el agua del envase y su raíz no se moje. La <i>T.usneoides</i> puede sumergirse sin necesidad de estar suspendida, dado a su estructura. Cada muestra debe estar sumergida en el agua 1 hora. Es importante colocar la muestra en el agua inmediatamente después de pesarla en seco, para evitar que cambien sus condiciones de secado. Se deben cubrir los envases plásticos con una tela densa, para evitar que la iluminación altere el desempeño de absorción de las muestras.
2	Escurrimiento de muestras	Una vez completado el tiempo de sumersión, se remueve la muestra del envase con cuidado. Se debe sacudir la planta cuidadosamente y colocarla sobre un paño de microfibra por 10 minutos, para evitar cualquier exceso de agua en la toma de datos.
3	Peso de muestras mojadas	Inmediatamente luego de los 10 minutos de escurrimiento, se coloca la muestra sobre la balanza analítica. Se espera a que se estabilice el peso y se toma el dato de su masa.

Luego de estas pruebas se utilizan las mismas muestras para llevar cabo la “Prueba de humidificación de bromelias, donde en vez de ser sumergidas, estas son expuestas a un ambiente

saturado en vapor de agua, para observar su capacidad de captación y absorción de agua en el aire. Para esta prueba también se determina un porcentaje de absorción tomando la masa de las plantas secas, y luego húmedas. Es importante mencionar que dado a ciertas limitaciones no se tuvo acceso a la Cámara de acondicionamiento para el secado de las plantas, por lo que se utilizó un horno de caja para secar las plantas, posterior al proceso de humidificación.

Cuadro 3.2. Protocolo para prueba de humidificación en agua de bromelias

PROTOCOLO PARA PRUEBA DE HUMIDIFICACIÓN DE BROMELIAS		
		Fecha: 17/11/2020
DESCRIPCIÓN GENERAL		
Este protocolo se desarrolla para la prueba de humidificación completa en agua en dos especies, <i>T.usneoides</i> y la <i>T.schiedeana</i> , para evaluar su capacidad de absorción de agua en el aire.		
#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Horno de caja	Thermo Scientific - Lindberg Blue M
1	Balanza analítica	BOECO BBI-31
1	Cronómetro	iPhone 8
1	Humidificador	Phol Schmidt, modelo HU-11 con depósito de agua de 1,5 litros y velocidad ajustable de neblina.
1	Caja de Acrílico	Dentro de ella se coloca el humidificador y la malla para generar el ambiente saturado en vapor de agua.
1	Beaker	Para colocar las plantas al pesarlas.
1	Alambre metálico	Alambre delgado y flexible para guindar las plantas.
1	Cinta adhesiva	Para adherir el alambre a las paredes de la caja de acrílico.
2	Bromelias	Dos muestras de <i>T.usneoides</i> y dos de <i>T.schiedeana</i> .

PROCESO		
ETAPA 1: SECADO		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Pre-acondicionamiento de las bromelias	Precalentar el horno de caja a 105°C. Colocar las muestras (dos a la vez) en el horno y dejarlas 1 hora en él. Supervisar que la temperatura del horno no aumente o disminuya. Para ello se puede abrir la puerta del horno por intervalos para evitar que la temperatura aumente mucho. Supervisar visualmente las plantas para evitar que se sequen en exceso o se quemen.
2	Peso de muestras secas	Una muestra a la vez se extrae del horno e inmediatamente se coloca sobre el beaker y la balanza analítica. Se espera a que el peso se estabilice y se anota el dato. Mientras se pesa una de las muestras, el resto debe permanecer en el horno, para evitar que absorban humedad durante el tiempo de espera.
ETAPA 2: HUMIDIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Humidificación de las bromelias	Colocar las muestras (dos muestras a la vez) sobre el alambre metálico y adherir el alambre a la caja de acrílico. Colocar el humidificador lleno de agua, en el extremo opuesto de la caja de acrílico. Conectar el humidificador, encenderlo a máxima potencia y colocar la caja de acrílico con las bromelias sobre el humidificador encendido. Dejar las plantas en la caja humidificada por 1 hora.
2	Escurrimiento de muestras	Una vez completada la hora de humidificación, se remueve la muestra de la caja con cuidado. Se debe sacudir la planta cuidadosamente y colocarla sobre un paño por 10 minutos, para evitar cualquier exceso de agua en la toma de datos.
3	Peso de muestras humedecidas	Inmediatamente luego de los 10 minutos de escurrimiento, se coloca la muestra sobre el beaker y la balanza analítica. Se espera a que se estabilice el peso y se toma el dato de su masa.

3.2 Prueba de mojabilidad de las especies *T.usneoides* y *T.schiedeana*.

Para comprender el por qué una de las especies de bromelia, tuvo mayor capacidad de absorción sobre la otra, posterior a las pruebas de sumersión y humidificación, se realizó la prueba de mojabilidad. En dónde se empleó el uso de un goniómetro para medir el ángulo de contacto entre la superficie de las bromelias y la gota de prueba. Las bromelias fueron recolectadas en el mismo sitio de dónde se recolectaron para las pruebas anteriores y las pruebas se realizaron en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC), en Costa Rica. A continuación, se detalla la metodología empleada para el experimento:

Cuadro 3.3 Protocolo para prueba de ángulo de contacto de las bromelias

PROTOCOLO PARA PRUEBA DE ÁNGULO DE CONTACTO DE LAS BROMELIAS		
PREPARACIÓN DE LA MUESTRA		
Este protocolo se desarrolla para la prueba de ángulo de contacto de las especies <i>T.usneoides</i> y <i>T.schiedeana</i>		
#	MATERIALES Y EQUIPO	OBSERVACIONES
1	<i>T.usneoides</i>	Una parte de la planta que tenga una hoja gruesa y dura.
1	<i>T.schiedeana</i>	Una parte de la planta que tenga una hoja gruesa y dura.
1	Computadora	Con el Software DROP image Advance
1	Micropipeta	Para depositar la gota
1	Goniómetro	Marca ramé hart instrument co. Modelo 100-25-M
1	Herramienta de Calibración	Consiste en una caja con un círculo para la calibración del goniómetro
PROCESO		

ETAPA 1: PREPARACIÓN DEL ESCENARIO		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Inicio	Activar la computadora y el software, asegurarse que el equipo esté nivelado. Encender la fuente de luz y retirar el protector de la cámara.
2	Calibración	Empleando la herramienta Contact Angle del Software Drop Image, se debe observar que el semicírculo que aparece en la pantalla se encuentre en blanco y muestre los valores 0.0, para ello se deben mover los tornillos debajo de la plataforma donde se coloca la gota. Posteriormente se debe colocar la herramienta de calibración, que consiste en un círculo negro, que se debe colocar sobre la plataforma y mover las perillas que la mueven vertical y horizontalmente. Se ubica el círculo en Live video del software y se ajusta la luz y la distancia de la cámara. Posteriormente, se toma la foto y se revisa con la opción Check Calibration, el diámetro debe dar 4.000 nm. Por último, se debe colocar en el centro del círculo la línea vertical y la línea verde horizontal en la parte inferior del círculo, de la ventana Set Cursor Position.
3	Selección de la hoja de la Bromelia	Se seleccionó una parte de las hojas de las bromelias que fuese dura y plana para poder utilizarla como superficie de contacto, se realizó un corte de esta parte y se colocó sobre la plataforma.
ETAPA 2: EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Dispensación de la gota	Se selecciona la micropipeta con la punta de 10 a 100 μm y se llenó con agua destilada. Posteriormente, se colocó la micropipeta en el soporte sobre la plataforma donde se colocarán las superficies. El volumen de la gota se dispensa manualmente en la parte superior de la micropipeta.

2	Medición de las muestras de superficie	Tras colocar la hoja de la bromelia en la plataforma, se aseguró que se observará en la ventana de Live Video en la computadora. Se colocó la gota sobre la superficie y se tomó una fotografía. Dada la rápida absorción de la gota, no es posible realizar la medición del ángulo de contacto.
---	--	--

3.3 Observación de la ultraestructura de la *T.usneoides*

Una vez concluido el estudio de absorción entre las especies, se procedió a realizar la observación microscópica de la microestructura de la planta, para describir la ultraestructura del tricoma foliar. El procedimiento se realizó en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC), en el Consejo Nacional de Alta Tecnología (CENAT). Se tomó una muestra fresca de la especie *T.usneoides* del Parque del Molino de la provincia de Cartago, Costa Rica, la muestra se recolectó a las 6 a.m. y se colocó en papel toalla húmedo, para evitar se colapsara, en una hielera se transportó has el LANOTEC, para realizar el protocolo de preparación de la muestra para la observación con el microscopio electrónico de barrido (MEB). A continuación, se muestra el protocolo para la preparación y montaje de la muestra:

Cuadro 3.4 Protocolo para preparación y montaje de la muestra de *T.usneoides* para MEB

PROTOCOLO PARA PREPARACIÓN Y MONTAJE DE LA MUESTRA PARA EL MEB		Fecha: 17/11/2020
DESCRIPCIÓN GENERAL		
Este protocolo se desarrolla para la preparación y montaje de la muestra de <i>T.usneoides</i> para Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).		
#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Cinta de sustrato de carbón con adhesivo en ambas caras	El ancho de este sustrato depende de la muestra.
1	Base estándar de aluminio	El diámetro de la base depende del tamaño de la muestra.
1	Regla	Verificación de dimensiones en general.

1	Balanza	Verificación del peso de las muestras.
1	Pinzas	Para la manipulación de la muestra.
1	Microscopio Electrónico de Barrido	Jeol JSM-6390LV Scanning Electron Microscop
#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Karnovsky	Solución Fijadora de Karnovsky (glutaraldehído 2.5%, paraformaldehído 2.0%, sucrosa 4% en amortiguador de fosfato de sodio 0.1M pH 7.4). Esta fijación debe realizarse a 4° C, preferiblemente.
1	Amortiguador de fosfato de sodio 0.1M pH 7.4	Se utiliza para los lavados del Karnovsky en la fijación.
1	Tetraóxido de Osmio	Posfijación con Tetraóxido de Osmio 2% (Solución madre 4%). El tetraóxido de Osmio se utiliza para fijar las grasas insaturadas en el tejido y se diluye en el amortiguador de fosfato de sodio 0.1M pH 7.4.
1	Agua Destilada	Se utiliza para los lavados, como último paso de la posfijación.
1	Alcohol	Se utiliza un gradiente ascendente de alcohol etílico
1	Acetato de amilo	Líquido intermediario para el secado por punto crítico con CO2 líquido.
PROCESO		
ETAPA 1: PREPARACIÓN DE LA MUESTRA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Almacenamiento de la muestra	La muestra se almacena en condiciones controladas
2	Fijación	Fijación inicial. Se toman muestras de <i>T. usneoides</i> de aproximadamente 1 cm ³ , se colocan en frasco de vidrio de 10 ml, con aproximadamente 3 ml de solución fijadora de Karnovsky (por lo general las muestras de hojas quedan flotando por la cantidad de espacios

		<p>intercelulares que poseen los tejidos internos) entonces se procede con una cámara de vacío a extraer el aire y así se logra que las muestras queden en el fondo. Las muestras se dejan por aproximadamente 12 a 24 horas en este fijador y a 4°C. Seguidamente se procede a realizar 3 lavados de 15 min cada uno con el amortiguador de fosfato de sodio 0.1M pH 7.4 (preferiblemente realizar estos lavados en cámara de extracción). Una vez realizada la primera fijación y los lavados con el amortiguador se procede a la posfijación (fijación de grasas insaturadas) con tetraóxido de osmio 2% por 2 horas y las muestras se colocan en una cámara de extracción (por la volatilidad y toxicidad del tetraóxido de osmio), una vez transcurrido el tiempo de posfijación se realizan 3 lavados con agua destilada y siempre con las muestras en la cámara de extracción. La muestra se puede dejar toda la noche en el último lavado de agua destilada. A partir del segundo lavado se puede continuar fuera de la cámara de extracción. Nota: desechar el Tetraóxido de Osmio y los cambios de agua en el envase etiquetado como “Desechos de Tetraóxido de Osmio” que se encuentra en la cámara de extracción.</p>
3	Deshidratación	<p>La deshidratación se realiza en un gradiente ascendente de etanol, se utiliza etanol de 30°, 50°, 70°, 80°, 90°, 95° estos cambios se realizan por 15 min cada uno, posteriormente se efectúan 2 cambios de 100° por 20 min cada uno. El tiempo en cada alcohol puede variar dependiendo del tamaño y dureza de la muestra.</p>
4	Secado de la muestra por punto crítico	<p>Seguido de la deshidratación procedemos a realizar los cambios con el líquido intermediario para el secado con CO2 líquido, se elimina el etanol de 100° y se coloca la muestra en una mezcla 1:1 etanol 100°-acetato de amilo, por 20 min, se procede a realizar otro cambio en acetato de amilo puro por 20 min. Para el secado por punto crítico se realizan 5 cambios con el CO2 líquido, para eliminar el acetato de amilo (los cambios de CO2 dependen del tamaño y naturaleza de la muestra) y se procede a secar la muestra por punto crítico utilizando un Secador Modelo cdp300, Marca Leika.</p>

ETAPA 2: MONTAJE DE LA MUESTRA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Preparación de la base	Lijar suavemente sobre la superficie con lija 1600, para eliminar restos de sustratos o pinturas, una vez eliminados los sustratos limpiar con agua destilada y secar con aire comprimido, preferiblemente mantener la base 30 minutos a 40°C por 15 minutos, para eliminar humedad.
2	Medición de la muestra	Este paso será útil para montar la muestra en la cama de sustrato. Medir dimensiones y peso. Base de 51
3	Colocar la muestra sobre la cama de cinta de carbón con adhesivo en ambas caras	Se presiona suavemente la muestra sobre el perfil cortado en el sustrato de carbón, de forma que se garantice que toda la muestra haga contacto total sobre la capa de sustrato
4	Recubrimiento iónico de oro	Con el cobertor iónico, colocar una o más capas de oro, según lo que sea conveniente. Aproximadamente 4 nm de grosor. Equipo Ms150r
5	Observación MEB	Una vez montada y recubierta la muestra se observó en un microscopio electrónico de barrido (MEB).

3.4 Prueba para la selección de malla comercial

La prueba se realizó con tres tipos diferentes de mallas para exponerlas a un ambiente saturado en vapor de agua (con humedad relativa de 100%) y así comprobar cuál tiene mayor capacidad de recolección. Las mallas por utilizar se adquirieron en ferreterías del país, siendo específicamente la malla Raschel con un coeficiente de sombreado de 90% (figura 3.1a), cedazo de plástico para mosquitos (figura 3.1b) y malla de fibra de vidrio (figura 3.1c).

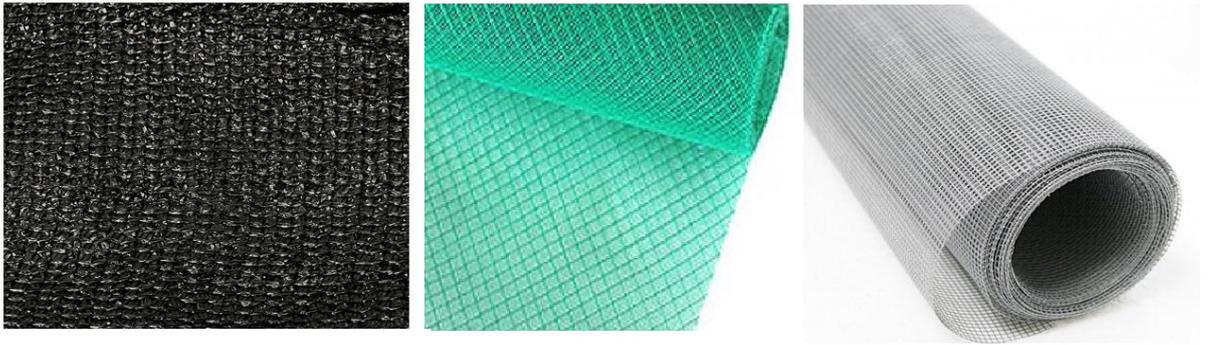


Figura 3.1 Mallas comerciales para la prueba de captación de agua. a) Malla Raschel b) Cedazo de plástico c) Malla de fibra de vidrio. Fuente: Elaboración Propia

Antes de realizar la prueba se calculó el coeficiente de sombreado para las tres mallas, para identificar la cantidad de fibra con respecto al espacio libre o cavidades, ya que esto puede influir en su capacidad de captación de agua. El coeficiente se obtuvo de la ecuación 2.1 y 2.2 del capítulo 2.1.1.3 Tecnología de las Mallas. Se utilizó un vernier marca Truper con una exactitud de 0,02 mm para medir la cantidad de área sombreada y área libre en una pequeña porción de cada malla, de manera que se puede obtener así el coeficiente de sombreado.

Cuadro 3.5 Protocolo para prueba de recolección de agua en mallas comerciales

PROTOCOLO PARA PRUEBA DE RECOLECCIÓN DE AGUA EN MALLAS COMERCIALES		
		Fecha: 21/10/2020
DESCRIPCIÓN GENERAL		
Este protocolo se desarrolla para la prueba de captación de agua en diferentes tipos de mallas, con diferente área de sombreado y material.		
#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Malla tipo Raschel	Muestra 18 cm de ancho y 20 cm de largo.
1	Malla de fibra de vidrio	Muestra 18 cm de ancho y 20 cm de largo.
1	Malla de plástico verde	Muestra 18 cm de ancho y 20 cm de largo.
1	Humidificador	Phol Schmidt, modelo HU-11 con depósito de agua de 1,5 litros y velocidad ajustable de neblina.

1	Caja de acrílico	Dentro de ella se coloca el humidificador y la malla para generar el ambiente saturado en vapor de agua.
1	Envase transparente pequeño	Para recolectar el agua captada por la malla. Debe de tener un ancho de 18 cm o más para cubrir el ancho entero de la malla.
1	Alambre metálico	Alambre de acero inoxidable delgado para sujetar la malla con firmeza durante la prueba.
1	Cinta Adhesiva	Para colocar la malla en la caja a través de los alambres metálicos.
PROCESO		
ETAPA 1: PREPARACIÓN DEL ESCENARIO		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Sujeción de la malla en la caja de acrílico.	<p>La muestra de la malla debe tener dimensiones de 18 cm de ancho y 20 cm de largo, estas se eligen con base al tamaño de la caja de acrílico a utilizar.</p> <p>Se cortan dos pedazos de alambre con un largo un poco mayor al ancho de la caja de acrílico. Se teje cada alambre a través de la malla, en su parte superior e inferior. Se debe de tejer sobre la parte más alta y baja de la malla, para no interferir en el área de captación disponible de la malla.</p> <p>Los extremos de los alambres deben de extenderse hasta cada lado de la caja de acrílico. Se adhiere cada extremo del alambre con cinta adhesiva sobre ambas paredes laterales de la caja.</p> <p>Al adherir los alambres a las paredes de la caja se debe de tensar con fuerza, para asegurarse que la malla se encuentre rígida y en posición perpendicular al suelo, ya que cualquier inclinación puede alterar su desempeño de captación de agua.</p> <p>Una vez colocada la malla para la primera prueba se marca su posición, para colocar las mallas a la misma distancia y altura del humidificador en las pruebas posteriores.</p>
2	Colocación del humidificador	<p>Se coloca un paño en el suelo, y sobre él el humidificador.</p> <p>A la par se coloca el envase recolector de agua,</p>

		<p>posicionado de manera que quede justamente por debajo de la malla.</p> <p>Se enciende el humidificador y se coloca a velocidad máxima de neblina.</p> <p>Se coloca la caja de acrílico sobre el humidificador, de manera que queda encerrado con la malla y el envase debajo de ella.</p>
ETAPA 2: EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Proceso de humidificación	<p>En el momento en que se coloca la caja sobre el humidificador encendido se empieza a tomar el tiempo.</p> <p>La malla se debe exponer al ambiente nublado por 1 hora.</p> <p>Se debe supervisar el procedimiento, para asegurarse que el humidificador mantenga una generación de neblina constante.</p>
2	Obtención del volumen de agua	<p>Después de 40 minutos se levanta la caja de acrílico y se apaga el humidificador.</p> <p>Se toma el envase recolector de agua y se mide su contenido en mL.</p> <p>El agua del envase representa las gotas de agua que fueron captadas por la malla y canalizadas a su parte inferior, eventualmente cayendo sobre el envase.</p>
3	Observación de la malla	<p>Se despegan los alambres que sostienen la malla a la caja con cuidado, para no alterar el estado de la malla.</p> <p>Se toman fotografías a la malla, para observar las gotas que permanecen sobre ella al final de la prueba.</p>

3.5 Prueba de ángulo de contacto de los materiales

Se realizaron pruebas del ángulo de contacto, entre el agua y los materiales seleccionados para la fabricación de la malla de colección. Específicamente, una mezcla 1:1 de silicón genérico y ABS con fibra de carbono. El procedimiento se detalla a continuación:

Cuadro 3.6 Protocolo para prueba de ángulo de contacto de los materiales

PROTOCOLO PARA PRUEBA DE ÁNGULO DE CONTACTO DE LOS MATERIALES		
		Fecha: 30/09/2021
PREPARACIÓN DE LA MUESTRA		
Este protocolo se desarrolla para la prueba de ángulo de contacto de los materiales ABS con fibra de carbono y silicón genérico		
#	MATERIALES Y EQUIPO	OBSERVACIONES
1	Filamento de ABS con Fibra de Carbono	Marca: 3DXTech. De los materiales disponibles, con características hidrofílicas para impresión 3D.
1	Silicón Genérico	Hule y Látex Costa Rica. De los materiales disponibles con características hidrofóbicas. Mezcla 1:1 Silicón y Catalizador
1	PLA	DGTalic, para moldeo de silicón.
1	Tazón de Mezcla	Para mezclar el silicón con el catalizador
1	Goma en Barra	Para adherir la primera capa de impresión con la mesa de la impresora
1	Impresora en 3D	Prusa MK3S+
1	Computadora	Con el Software DROP image Advance
1	Micropipeta de 100 µl	Para depositar la gota
1	Goniómetro	Marca ramé hart instrument co. Modelo 100-25-M
1	Herramienta de Calibración	Consiste en una caja con un círculo para la calibración del goniómetro
PROCESO		
ETAPA 1: PREPARACIÓN DEL ESCENARIO		

# PASO		OBSERVACIONES
1	Inicio	Activar la computadora y el software, asegurarse que el equipo esté nivelado. Encender la fuente de luz y retirar el protector de la cámara.
2	Calibración	Empleando la herramienta Contact Angle del Software Drop Image, se debe observar que el semicírculo que aparece en la pantalla se encuentre en blanco y muestre los valores 0.0, para ello se deben mover los tornillos debajo de la plataforma donde se coloca la gota. Posteriormente se debe colocar la herramienta de calibración, que consiste en un círculo negro, que se debe colocar sobre la plataforma y mover las perillas que la mueven vertical y horizontalmente. Se ubica el círculo en Live video del software y se ajusta la luz y la distancia de la cámara. Posteriormente, se toma la foto y se revisa con la opción Check Calibration, el diámetro debe dar 4.000 nm. Por último, se debe colocar en el centro del círculo la línea vertical y la línea verde horizontal en la parte inferior del círculo, de la ventana Set Cursor Position.
3	Impresión y moldeo de superficie de prueba	Se imprimió una placa de 4x4 cm en ABS con fibra de carbono y el negativo de la placa (una caja), en PLA para el moldeo de las superficies de prueba, se utilizó la goma en barra para adherir la primera capa de impresión en la mesa de la impresora. Para el moldeo, se mezcló el catalizador con el silicón, en el tazón, hasta obtener una mezcla homogénea y se chorreó en el molde de PLA.
ETAPA 2: EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Dispensación de la gota	Se selecciona la micropipeta con la punta de 10 a 100 μm y se llenó con agua destilada. Posteriormente, se colocó la micropipeta en el soporte sobre la plataforma donde se colocarán las superficies. El volumen de la gota se dispensa manualmente en la parte superior de la micropipeta.

2	Medición de las muestras de superficie	Se colocó la placa de ABS con fibra de carbono sobre la plataforma. Se aseguró que se observará en la ventana de Live Video en la computadora. Se colocó la gota sobre la superficie y se tomó una fotografía. Se seleccionó la herramienta CA Tools, la opción Contact Angle en la computadora y con las líneas verdes que se ubica dónde realizar la medición del ángulo de contacto (la línea vertical se coloca en la parte central de la gota y la línea horizontal sobre la superficie). Luego, se selecciona el sólido (superficie), el líquido que se utilizó agua destilada y el aire. Por último, se seleccionó las opciones (Star y Measures) para realizar las mediciones del ángulo de contacto.
---	--	---

3.6 Medición de histéresis del ángulo de contacto

Se realizaron mediciones de la histéresis del ángulo de contacto sobre los perfiles de filamento de cada material utilizado para la fabricación de la malla recolectora. El procedimiento realizado para este experimento se detalla en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.7 Protocolo para medición de histéresis del ángulo de contacto

PROTOCOLO PARA MEDICIÓN DE HISTÉRESIS DEL ÁNGULO DE CONTACTO		
		Fecha: 18/10/2021
DESCRIPCIÓN GENERAL		
Este protocolo se desarrolla para la medición del ángulo de avance y ángulo de retroceso de una gota desplazándose sobre la capa hexagonal de cada material en posición vertical.		
#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Capa hexagonal de ABS con Fibra de Carbono	Para colocar la gota sobre las secciones de 90 grados de los hexágonos.
2	Capa hexagonal de silicón	Para colocar la gota sobre las secciones de 90 grados de los hexágonos.
3	Alambre Metálico	Muestra de 17.8 cm de ancho y 16.3 cm de largo.

4	Pipeta de 1000 μ l	Para colocar la gota sobre el material.
5	Cámara	Cámara celular de modelo iPhone 8s.
6	Temporizador	Temporizador de celular.
PROCESO		
ETAPA 1: PREPARACIÓN DEL ESCENARIO		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Sujeción de la capa hexagonal	Se sujeta la capa con alambre metálico para mantenerla en una posición de 90 grados.
ETAPA 2: EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Colocación de gota de agua	Utilizando la pipeta, se coloca una gota de agua sobre el lado vertical del hexágono. Se inicia el temporizador apenas se coloca la gota sobre el filamento.
2	Toma de fotografías	Se toma una foto de la gota de agua cada en los siguientes tiempos: 0 s, 15 s, y 30 s. Para obtener un rango de ángulos de contacto durante el desplazamiento de la gota.
3	Medición de ángulos de contacto	Se sobrepone la imagen sobre el software AutoCad y se mide el ángulo de avance y de retroceso para cada gota.
4	Cálculo de histéresis del ángulo de contacto	Se toma la diferencia entre el ángulo de avance y el ángulo de retroceso. Se mide una histéresis para cada fotografía tomada.
5	Repetir proceso	Se repite la medición para cada material y cada perfil de la capa hexagonal.

3.7 Prototipo de la malla de recolección

Para el diseño de la malla de recolección, se utilizó el programa de dibujo SolidWorks, en dónde se dibujó una capa hexagonal, la cual corresponde a la capa central y dos capas

desordenadas simulando la macroestructura de la *T.usneoides*, la cual corresponde a las capas externas. Teniendo en total 3 capas, “estilo sándwich”, cuya área de sombreado conjunta es de 35%. Se realizaron dos mallas de recolección, la malla ASA (ABS, Silicón, ABS) y la malla SAS, (Silicón, ABS, Silicón). Para fabricarlas, se emplearon dos métodos distintos: el primero fue por impresión 3D, para imprimir en el material ABS con fibra de carbono y el segundo fue mediante el chorreo de silicón en un molde de PLA, ambas fabricaciones se realizaron en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología del Consejo De Alta Tecnología (CENAT), Costa Rica.

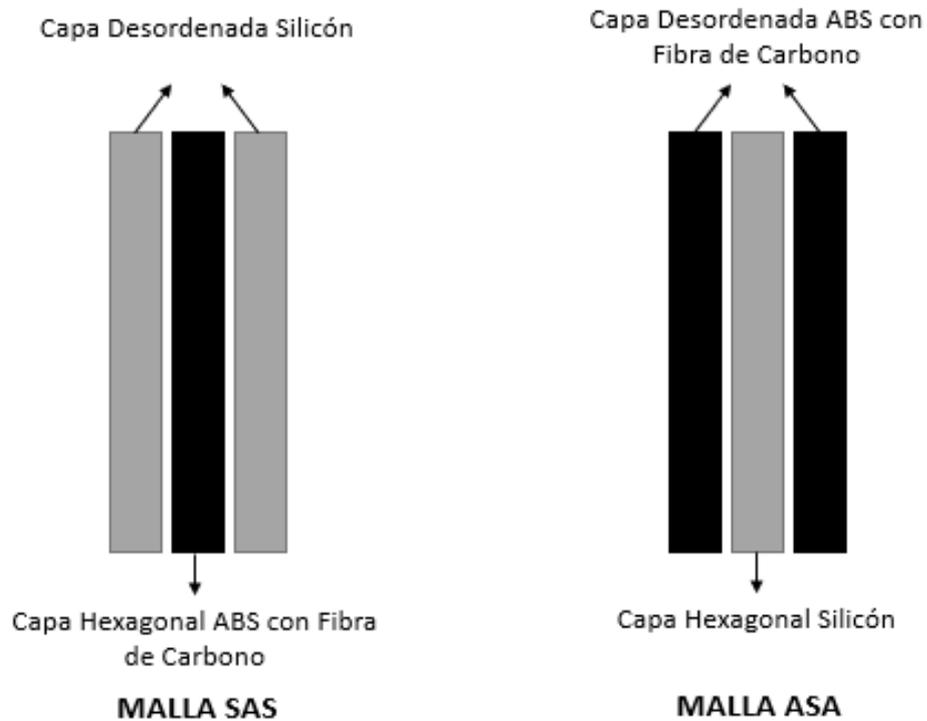


Figura 3.2 Configuración de Mallas SAS y ASA y sus materiales. Elaboración Propia.

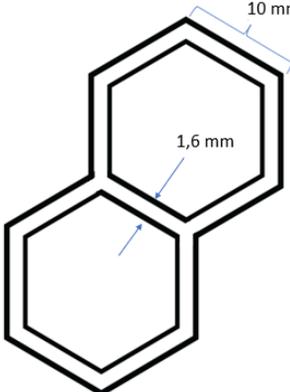
Cuadro 3.8 Protocolo para el diseño y fabricación de las mallas de recolección

PROTOCOLO PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LA MALLA DE RECOLECCIÓN	
	Fecha: 22/05/2021 - 8/10/2021
DESCRIPCIÓN GENERAL	
Este protocolo se desarrolla para el diseño y fabricación de las mallas de recolección de agua de neblina.	

#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Filamento de ABS con Fibra de Carbono	Marca: 3DXTech. De los materiales disponibles, con características hidrofílicas para impresión 3D.
2	Silicón Genérico	Hule y Látex Costa Rica. De los materiales disponibles con características hidrofóbicas. Mezcla 1:1 Silicón y Catalizador
3	PLA	DGTalic, para moldeo de silicón.
4	Impresora Prusa MK3S+	Resolución: 50 μ m, para impresión de ABS con Fibra de Carbono
5	Tazón de mezcla	Para la mezcla de silicón y catalizador.
6	Goma en barra	Para adhesión del filamento a la mesa de impresión
7	Tornillos	Para el marco de sujeción

PROCESO

ETAPA 1: Diseño de la malla multicapas

# PASO		OBSERVACIONES
1	Diseño de capa central (hexagonal)	<p>Para el diseño de la capa hexagonal, se dibujaron hexágonos con un ancho de perfil de 1.6 mm y un ancho de lado de 10 mm.</p>  <p><i>Figura 3.3</i> Diseño de hexágonos para la capa hexagonal. Elaboración Propia</p> <p>Se dibujaron los hexágonos en Solidworks y se aplicó la función de Linear Sketch Pattern</p>

		para replicar el parámetro. Las dimensiones de esta capa fueron limitadas por la capacidad del software para un tamaño de (158 x 137) mm.
2	Diseño de capas exteriores (desordenada)	Esta capa se diseñó empleando la herramienta spline de Solidworks, de forma aleatoria, iterando en conjunto con el ancho de los hexágonos para obtener el área de sombreado de 35%. Las dimensiones de estas capas fueron delimitadas por la capacidad del Software para un tamaño de (178 x 163) mm.
3	Diseño de Marco de Sujeción	Se diseñó en SolidWorks y consiste en un marco con dos piezas, que funcionan como una prensa, para sostener las 3 capas. Se realizó con base en las dimensiones de la capa desordenada y con un lado abierto para permitir la caída de las gotas. Las dos partes del marco se sujetan mediante un par de tornillos.
ETAPA 2: Fabricación de las mallas		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Impresión en 3D	<p>Se utilizó impresión 3D para imprimir en el material ABS con Fibra de Carbono, para la capa interna hexagonal de la malla SAS y las capas externas desordenadas de la malla ASA. Se empleó el método FDM, con una boquilla de 0.4 mm. Una temperatura de boquilla de 230 °C y una temperatura de la mesa de 100 °C. Se utilizó goma para adherir el filamento de la impresión en la mesa de impresión.</p> <p>Además, también se utilizó el método de impresión FDM para la fabricación del molde donde se chorreó el silicón. Este molde se imprimió en PLA y se utilizó el diseño en “negativo” de las capas.</p> <p>Por último, se empleó la impresión para la fabricación del marco de sujeción de las capas, también en el material PLA, para esto se empleó una temperatura de boquilla de 200 °C y una temperatura de mesa de 60°C.</p>
2	Moldeo con silicón	Se mezcló el catalizador y el silicón por partes iguales en un tazón hasta obtener una mezcla

		uniforme. Se choreó en los dos moldes de las diferentes capas de manera uniforme. Una vez transcurridas las 4 horas, las estructuras se retiraron del molde.
3	Composición de las mallas	Se sujetaron las capas, trasponiendo una sobre la otra, hasta tener la configuración de “sandwich”: capa desordenada, capa hexagonal y capa desordenada, con las dos configuraciones distintas de los materiales: ASA y SAS y se sujetaron con el marco de PLA.

3.8 Prueba de capacidad de recolección de agua en mallas prototipo y malla Raschel

Se elaboró una prueba de recolección de agua sobre las mallas diseñadas para probar los prototipos y comparar su velocidad de recolección con respecto a la malla Raschel. Dicho experimento se realizó en el LANOTEC.

Cuadro 3.9 Protocolo para prueba de recolección de agua en mallas prototipo y malla Raschel

PROTOCOLO PARA PRUEBA DE CAPACIDAD DE RECOLECCIÓN DE AGUA EN MALLAS PROTOTIPO Y EN MALLA RASCHEL		Fecha: 11/09/2021 - 23/10/2021
DESCRIPCIÓN GENERAL		
Este protocolo se desarrolla para la prueba de recolección de agua en las dos mallas prototipo (denominadas como malla 1 y 2) y la malla Raschel		
#	MATERIALES	OBSERVACIONES
1	Malla tipo Raschel	Muestra de 17.8 cm de ancho y 16.3 cm de largo.
2	Malla 1 (ASA)	Muestra de 17.8 cm de ancho y 16.3 cm de largo.
3	Malla 2 (SAS)	Muestra de 17.8 cm de ancho y 16.3 cm de largo.

4	Humidificador	Phol Schmidt, modelo HU-11 con depósito de agua de 1,5 litros y velocidad ajustable de neblina.
5	Manguera de tipo acordeón	Manguera con boquilla de 35.1 mm para que el vapor fluya desde la boquilla del humidificador hasta el frente de la malla.
6	Soportes universales	Un soporte para sostener la manguera del humidificador y otro soporte para sostener la malla a 90 grados.
7	Envase	Para recolectar el agua captada por la malla. Debe de tener un ancho de 18 cm o más para cubrir el ancho entero de la malla.
8	Alambre metálico	Alambre de acero inoxidable delgado para sujetar la malla con firmeza durante la prueba.
8	Balanza analítica	Marca de la balanza ADAM equipment Modelo: Highland Portable Precision Balance HCB 1502, resolución 0.01
9	Beaker	Beaker de 1000 mL
PROCESO		
ETAPA 1: PREPARACIÓN DEL ESCENARIO		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Peso de malla seca	Medir con balanza analítica peso de malla seca.
2	Sujeción de la malla en el soporte universal	Se sostiene la malla con una prensa y con alambre metálico para que quede en posición perpendicular con respecto al flujo de vapor.
3	Preparar humidificador	Llenar con 550 mL (usar Beaker para medir volumen) el humidificador.
4	Colocación del humidificador	Se sujeta la boquilla de la manguera del humidificador a una distancia de 20 cm de la malla y se centra con respecto a la malla. Se calcula la velocidad de flujo en humidificador de 0.00568 mm/min, basado en volumen de agua en humidificador, tiempo y diámetro de la boquilla de salida del vapor.

ETAPA 2: EJECUCIÓN DE LA PRUEBA		
# PASO		OBSERVACIONES
1	Proceso de recolección de agua	El siguiente proceso se debe repetir para cada malla. Cuando se enciende el humidificador se empieza a medir el tiempo. Se toman mediciones del peso en gramos del agua que va cayendo sobre el envase, por cada 5 minutos, hasta llegar a un total de 100 minutos. Durante el proceso de recolección se toman fotografías de las mallas.
2	Peso de malla mojada	Cuando se termina la prueba de recolección de agua inmediatamente se debe de tomar el peso de la malla mojada, sin escurrirla.
3	Obtener velocidad de recolección de agua	Se grafican los datos de tiempo contra el peso de agua recolectado y la velocidad se obtiene en base a la pendiente lineal de los datos.

Capítulo 4

Resultados y discusión

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos de realizar todos los procedimientos metodológicos del capítulo anterior. Además, se expondrán los análisis de los mismos, con fundamento de la teoría expuesta en el capítulo 2.

4.1 Selección de la especie de Bromelia

Para poder determinar cuál de las dos especies en estudio (*T.usneoides* y *T.schiedeana*) tiene mayor capacidad de absorción, se realizaron dos tipos de pruebas, la de humidificación en ambientes controlados y la de sumersión completa. A partir de estas pruebas es que se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación:

Cuadro 4.1 Resultados de pesos y porcentaje de absorción de Prueba de humidificación de las especies de *Tillandsia*

Muestra	Tipo	Peso seca (m1) (±0.0001 g)	Peso mojada (m2) (±0.0001 g)	Porcentaje de absorción	Incertidumbre (±%)
1	<i>T.usneoides</i>	1,4615	3,0626	52,2791%	0,0010%
2	<i>T.schiedeana</i>	6,8321	9,1244	25,1227%	0,0008%
3	<i>T.usneoides</i>	2,3408	4,8927	52,1573%	0,0015%
4	<i>T.schiedeana</i>	16,8356	21,3088	20,9923%	0,0004%

Cuadro 4.2 Resultados de pesos y porcentaje de absorción de Prueba de sumersión de las especies de *Tillandsia*

Muestra	Tipo	Peso seca (m1) (±0.0001 g)	Peso mojada (m2) (±0.0001 g)	Porcentaje de absorción	Incertidumbre (±%)
1	<i>T.usneoides</i>	8,1838	12,5341	34,7077%	0,0010%
2	<i>T.schiedeana</i>	14,7923	16,9605	12,7838%	0,0008%
3	<i>T.usneoides</i>	6,3287	8,4823	25,3893%	0,0015%
4	<i>T.schiedeana</i>	26,1687	32,7415	20,0748%	0,0004%

Se puede observar que, para ambas pruebas, la que presenta mayor capacidad de absorción, debido a que presenta un mayor cambio en los pesos, corresponde a la *T.usneoides* tanto para la muestra 1 como para la muestra 3. Se destaca que la diferencia es bastante significativa, para el caso de la primera prueba, el peso de las dos muestras de *T.usneoides* se duplica cuando la planta está mojada, por lo que sus porcentajes de absorción son aproximadamente 50%. En la segunda prueba, de sumersión la diferencia entre los pesos de las muestras secas y mojadas también es significativamente mayor para la *T.usneoides* que para la *T.schiedeana*. Para identificar la razón por la cual esto sucede, según la bibliografía puede ocurrir por dos razones principalmente, por la densidad de los tricomas o por la mojabilidad de la planta, es decir qué tan hidrofílica es. Con respecto a la primera hipótesis no se han encontrado datos fiables que permitan comparar la cantidad de tricomas entre ambas especies. En lo que respecta a la segunda hipótesis, se hicieron pruebas de mojabilidad, con el goniómetro para poder comparar la capacidad hidrofílica entre ambas especies.

4.2 Prueba de mojabilidad para las especies *Tillandsia* sp.

Al realizar la prueba de mojabilidad en el goniómetro para el caso de la *T.schiedeana*, se observó que al caer la gota se esparció el agua de manera casi inmediata sobre la superficie de la planta y no fue posible medir el ángulo de contacto, por definición cuando esto sucede, se determina que el ángulo es menor a 30°. En la figura 4.1a se puede observar cómo se ve la punta de la micropipeta y no se logra observar la formación de la gota sobre la hoja de la planta. En la figura 4.1b se observa en el área más cercana a la punta, el agua dispersa en la hoja, ya que tiene una coloración más oscura y no se ven los tricomas blancos. Se determina, por lo tanto, que la superficie es hidrofílica dado que su ángulo de contacto es menor a 90°, sin embargo, no se puede afirmar que es superhidrofílica, porque para determinar eso, se tendría que asegurar que el ángulo de contacto es menor a 10°, de igual forma es común que en las superficies de las plantas donde el agua se esparce de forma muy rápida, es debido a que su superficie es superhidrofílica (Koch, *et.al.* 2009)

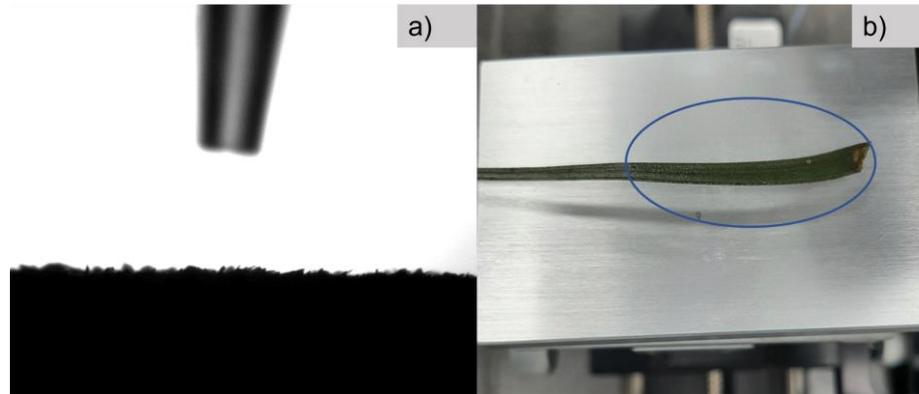


Figura 4.1. Prueba de ángulo de contacto de *T.schiedeana*. a) Punta de micropipeta al depositar la gota sobre la hoja. b) Hoja de la planta sobre la plataforma, después de caer la gota.

Para el caso de la *T.usneoides* debido a que las hojas de la planta son muy delgadas, no se logró encontrar una superficie rígida (plana y gruesa) sobre la cual se pudiese depositar la gota y para evitar dar un resultado incorrecto o una aproximación errónea, se decidió no realizar esta prueba. Se sabe mediante estudios previos que las superficies de la *T.usneoides* se consideran de igual forma como una superficie superhidrofílica (Koch *et.al.* 2009). Dado que no se tienen datos exactos para comparar los ángulos de contacto entre ambas especies, no se puede determinar si una tiene mayor mojabilidad que la otra. De igual forma, como la *T.usneoides* resultó presentar mejor capacidad de absorción mediante las pruebas de sumersión y humidificación, esta es la que se utilizará como referente para los próximos experimentos.

4.3 Caracterización ultraestructural de los tricomas foliares de *T.usneoides*

Dado que la especie que presentó mayor capacidad de absorción fue la *T.usneoides*, para el estudio ultraestructural de los tricomas se utilizó un microscopio electrónico de barrido. El espécimen observado (Figura 4.2a) corresponde a la punta de la hoja filiforme de la planta, en donde se puede apreciar que está cubierta por una gran densidad de tricomas multicelulares con forma de escamas peltadas (Stefano *et.al.* 2008), que se encuentran traslapadas. En el acercamiento a la hoja (Figura 4.2b) se puede observar la dimensión aproximada de su diámetro, que corresponde a 750 μm . Se aprecia a simple vista que estos tricomas se destacan por sus células de ala alargadas.

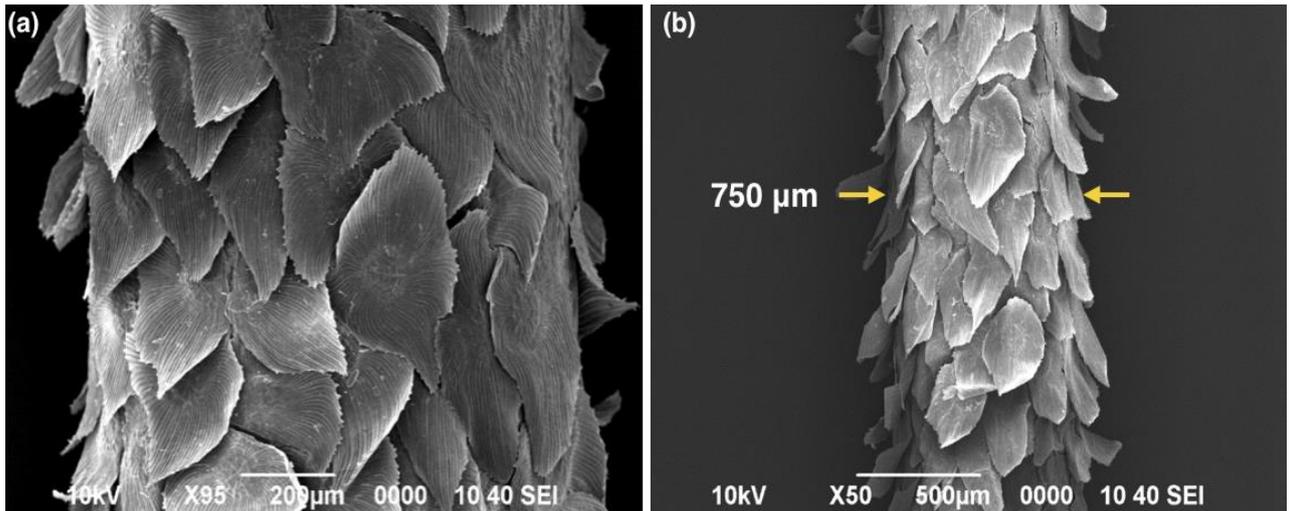


Figura 4.2. Punta de las hojas filiformes de la *T. usneoides*. (a) Punta de la hoja cubierta por tricomas. (b) Diámetro aproximado de la hoja.

El tricoma en estudio presenta la típica morfología descrita en la literatura, sobre las especies atmosféricas (Adams *et.al.* 1986) Las imágenes que se muestran representan la morfología externa del tricoma, llamada capa protectora. Se pueden apreciar (Figura 4.3b) las cuatro células centrales que conforman el disco central, las cuales tienen un diámetro entre 35 y 45 μm . Alrededor de estas, se encuentran dos bandas de células concéntricas, llamadas células de anillo. La primera banda, la más cercana al disco central, está compuesta por 8 células simétricas y la segunda banda tiene un total de 16 células. En total, el núcleo de la capa protectora del tricoma, compuesto por las células del disco central y las de anillo, tiene un diámetro entre 90 y 100 μm (Figura 4.3c) En la periferia del tricoma, continua a las células de anillo, se pueden observar múltiples células alargadas, que corresponden a las alas, las cuales se describirán con más detalle en la figura 4.5.

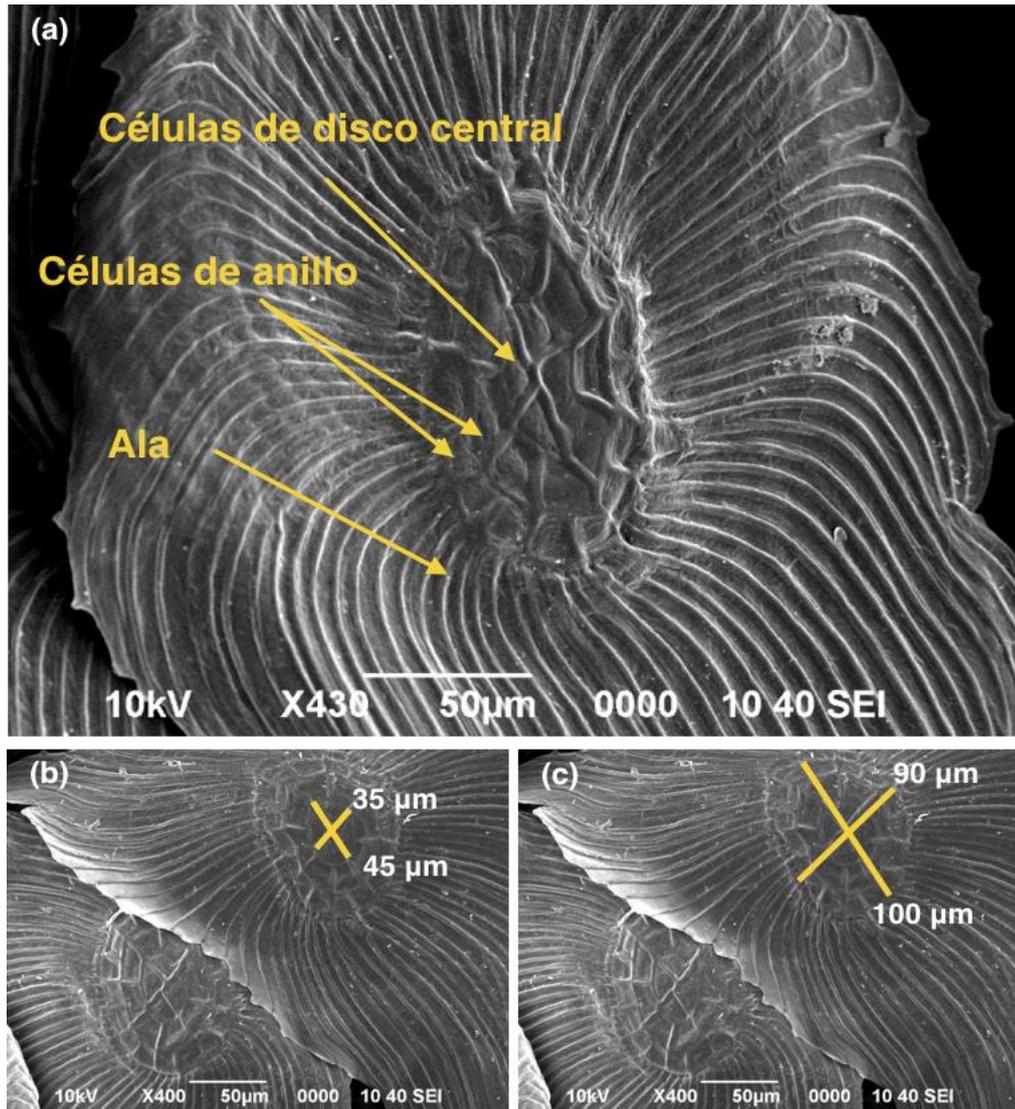


Figura 4.3. Acercamiento del tricoma de la hoja de la *T.usneoides*. (a) Núcleo del tricoma compuesto de las células del disco central y las células de anillo. (b) Dimensiones de la zona de las células del disco central. (c) Dimensiones de la zona central del tricoma.

El ala del tricoma se extiende horizontalmente a 80 μm del núcleo y verticalmente a 240 μm , como indican las dimensiones de la figura 4.4b. En total el tricoma tiene una dimensión de 200 μm a lo ancho y 460 μm a lo largo. Si se compara con las dimensiones de la zona central, se evidencia que las alas abarcan la mayor parte del tricoma. Es por medio de ellas que se genera la interposición entre los tricomas, lo que promueve también mayor captación de agua.

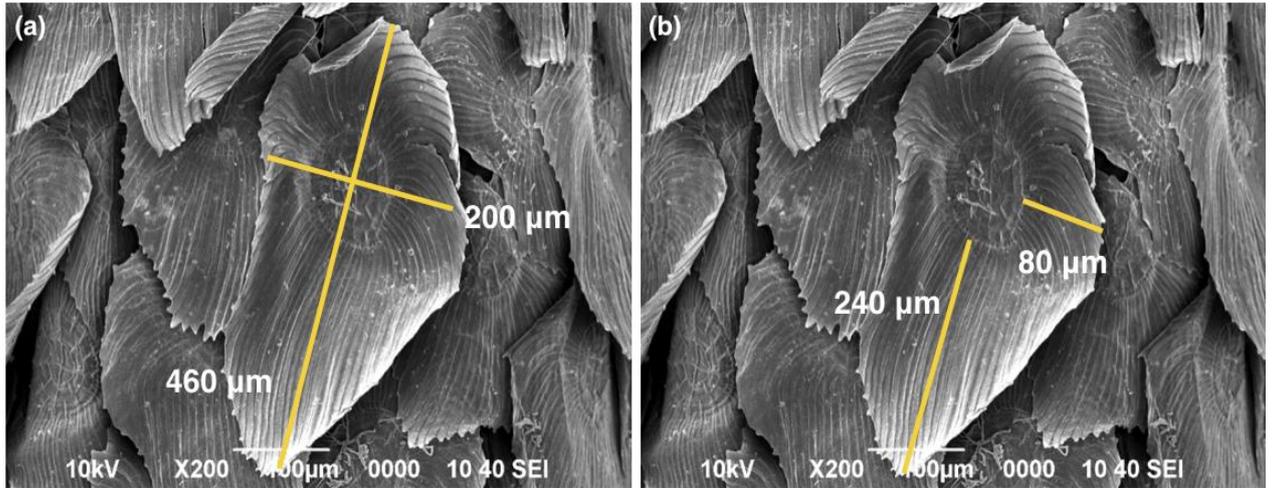


Figura 4.4. Tricoma con forma de escama peltada de la hoja de la *T. usneoides*. (a) Dimensión del tricoma compuesto del núcleo y el ala. (b) Dimensiones del ala del tricoma.

La siguiente imagen (Figura 4.5) muestra la estructura del ala compuesta de canales ondulados que van desde el extremo hasta la zona central del tricoma. Los canales tienen un ancho aproximado a los 9,0 μm . Estos promueven la canalización de las gotas de agua hacia el centro, cuando las alas descenden. Se pueden apreciar también de vista lateral en la figura 4.6.

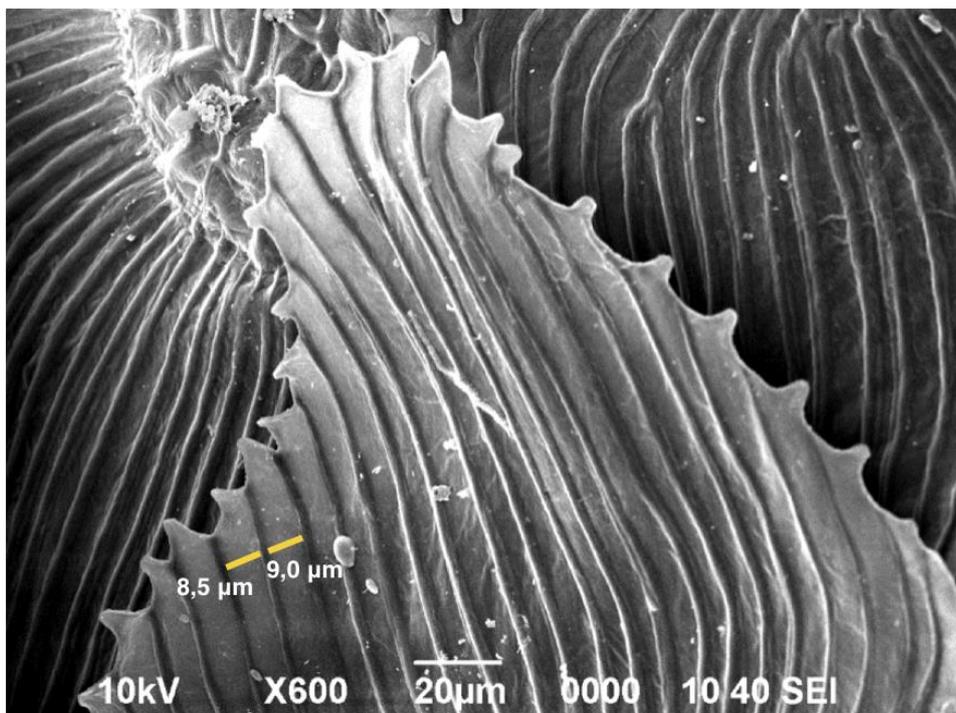


Figura 4.5. Estructura del ala del tricoma de la *T.usneoides* y dimensiones de las células del ala (canales).

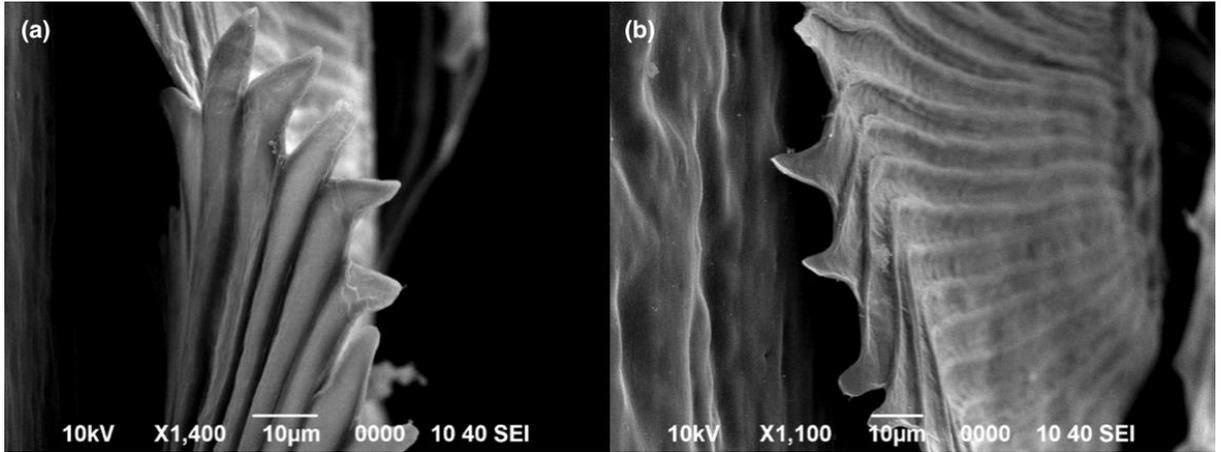


Figura 4.6. Vista lateral del ala del tricoma de *T.usneoides*.

4.4 Prueba de humidificación y captación de las mallas comerciales

Basado en el estudio de colectores de neblina, se evidencia que la colección por medio de mallas es muy utilizada para capturar gotas de agua del aire, como se menciona en el capítulo 2.1.1 Colectores de neblina. Por esta razón, se decidió considerar aspectos geométricos de las mismas, para basarse en el diseño de la malla recolectora. Con el objetivo de seleccionar una malla altamente eficiente, se evaluó entre los tipos de mallas obtenidas, la de mayor capacidad de recolección de agua. Se obtuvo también el área de sombreado de cada malla, para determinar cómo este factor influyó en el desempeño de estas. La siguiente figura muestra la demarcación del área tomada de cada malla, para calcular este coeficiente, marcado en azul es el área total medida y en rojo el área libre. El porcentaje de sombreado se obtiene con base al porcentaje de área libre por área de malla.

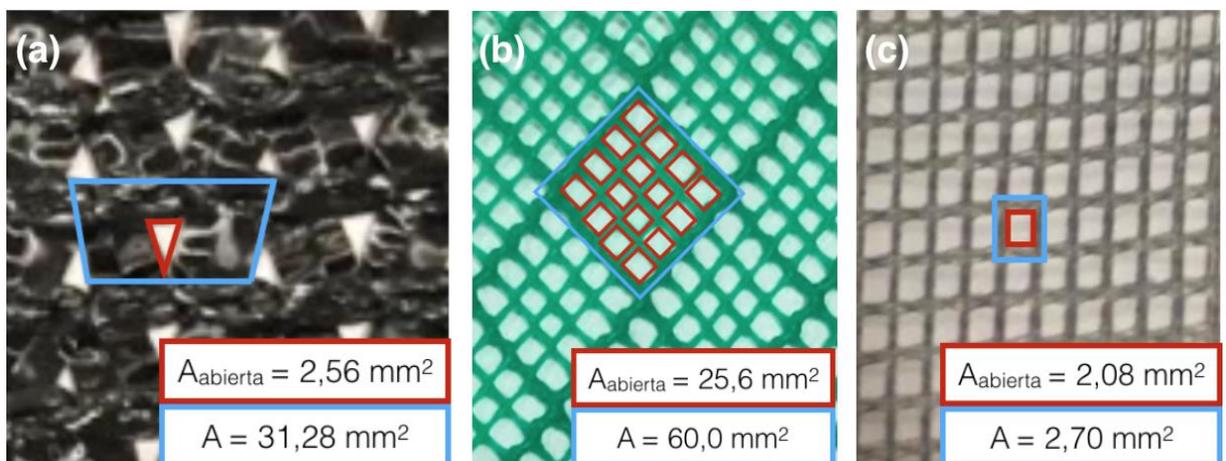


Figura 4.7. Área abierta (libre) y área total de porción de mallas: a) Malla Raschel b) Malla de plástico verde c) Malla de fibra de vidrio. Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 4.3 Resultados de volumen de agua recolectado por malla comercial

Muestra	Tipo de malla	Volumen de agua recolectada (ml \pm 0.05)	Coefficiente de Sombreado
1	Raschel	17,50	91,82%
2	Fibra de Vidrio	16,25	22,96%
3	Verde	17,20	57,33%

En el Cuadro 4.3 se muestran los volúmenes recolectados de agua, siendo la malla Raschel la de mayor capacidad de recolección de agua con un volumen de 17,5 ml. Esta malla también tiene el coeficiente de sombreado más alto de un 91,82%. Esto significa que las cavidades abarcan únicamente un 8,18% de la malla. Es evidente que el porcentaje alto de sombreado contribuyó a la mayor captación de gotas de agua, ya que hay más espacio para que se depositen las gotas provenientes del humidificador. La malla verde de plástico logró recolectar una cantidad similar de agua con un coeficiente de sombreado de 57,33%. En cambio, la malla de fibra de vidrio presenta un coeficiente de sombreado muy bajo de 22,96% lo que permite que la mayoría de las gotas de agua pasen a través de la malla. Cabe mencionar, que estos resultados están sujetos al tipo de prueba que se llevó a cabo y no a la intemperie. Ya que un coeficiente de sombreado de 91,82% puede afectar la eficiencia de la malla negativamente en condiciones reales, debido a que el flujo de aire puede ser obstruido por la misma malla y buscará pasar lateralmente y no a través de ella (Rivera, 2011). En esta prueba las mallas no se expusieron a flujos de aire de alta velocidad ya que este factor se ve limitado a la potencia del humidificador. Por lo mismo, esto no afectó en la recolección de la malla, y un alto coeficiente de sombreado logró generar mayor colección de agua.

Otro factor que influye en la recolección de agua de las mallas es su geometría. La malla de fibra de vidrio con menor recolección de agua tiene poros o cavidades de forma rectangular, y sus fibras son cilíndricas. Al final de la prueba de humidificación se observó con atención la malla para poder analizar la dinámica de la deposición de las gotas. Se observó que había muchas gotas del tamaño del poro que cubrían este por completo. Dado que la forma del poro es rectangular se puede deducir que la dinámica de las gotas de agua se dio como se muestra en la figura (4.8a). En donde se depositan pequeñas gotas alrededor de la fibra, que colisionan entre ellas para formar gotas un poco más grandes. Luego estas colisionan en todas direcciones hasta formar una sola gota grande que cubre todo el poro. Esta permanece de esta manera hasta llegar a un tamaño límite donde su peso la hace caer hacia abajo. Este sistema no es el más eficiente ya que mientras la gota permanece en el poro está bloqueando el espacio para que se depositen otras gotas. (Rajaram, *et. al.*, 2016) Por lo que los poros rectangulares no promueven el desplazamiento rápido de las gotas

hacia abajo. Además, las gotas de agua que caen al lado de las fibras pueden desprenderse fácilmente por estar a la dirección del viento, lo que reduce el potencial de recolección.

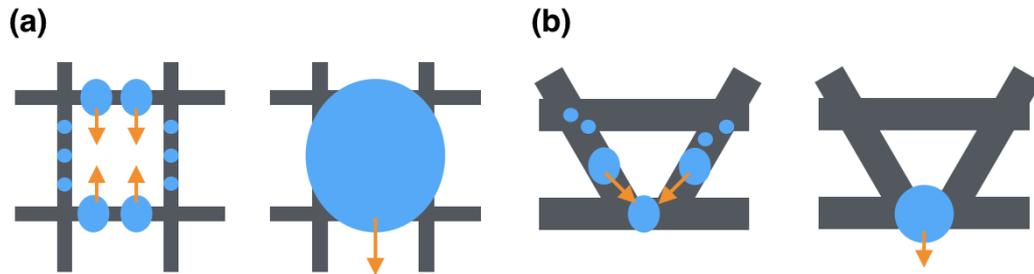


Figura 4.8. Deposición de gotas por geometría de malla: a) Geometría de malla con cavidad rectangular b) Geometría de malla con cavidad en forma de triángulo inverso. Fuente: Elaboración Propia

La malla Raschel ha probado ser de las más eficientes ya que su fibra es plana, por lo que todas las gotas se depositan en la cara frontal de la fibra. (Rajaram, *et. al.*, 2016) La dinámica de las gotas de agua en la malla Raschel se presenta en la figura (4.8b), en este caso las gotas se desplazan a través de las fibras plana posicionadas diagonalmente, donde van colisionando entre sí hasta caer al punto final del triángulo. Por su geometría triangular y el hecho de que sus fibras son más anchas y planas, genera que las gotas se unan en un solo punto como se muestra en la figura, y no en la cavidad de la malla. En este caso, las gotas se resbalan con más velocidad a través de la malla hasta caer en el recolector. Es probable que la malla de plástico verde también tuvo éxito al recolectar agua porque tiene pequeños poros en forma de rombo. Las gotas se pueden desplazar a través de las fibras diagonales, colisionando entre ellas hasta llegar a la parte baja de la malla. Es más eficiente que las fibras estén en posición diagonal que en posición vertical u horizontal con respecto al suelo. Dado los resultados, se planea utilizar la malla Raschel como parte del diseño para el recolector de agua, ya que probó tener la mayor capacidad de recolección de agua, y basado en el análisis, su geometría es la más eficiente para promover el desplazamiento de las gotas de agua hacia el colector de agua sin la obstrucción de los poros.

4.5 Estructura de mallas prototipo

Con base en las experiencias obtenidas en la prueba de mallas comerciales y de la caracterización ultraestructural de los tricomas foliares de *T.usneoides*, se inició con el proceso de diseño de la estructura de mallas prototipo. La malla consta de 3 capas que permiten hacer una combinación de distintas mojabilidades, por la diferencia de los materiales que las componen, esta configuración se realiza como biomimesis al mecanismo de las bromelias que cierra sus alas una vez el agua es ingresada, para evitar la salida de esta. Probando con distintas mojabilidades,

se intenta que exista un ingreso del agua a la capa interna de la malla y que las capas externas protejan a las gotas para que se mantengan en el interior y no reingresen al flujo del aire.

Con respecto a la geometría de las capas, basado en el comportamiento eficiente de acumulación de las gotas que se observó tras realizar el experimento de recolección en las mallas comerciales (figura 4.8b), se decide realizar una malla interior hexagonal, ya que se utiliza el mismo principio de acumulación de gotas en los filamentos de la capa y no en el poro, pero además permite dar continuidad al camino de la gota para que descienda y vuelva a realizar este proceso en el hexágono inferior, hasta llegar al final de la malla donde puede ser recolectada, como se puede observar de manera sencilla en la siguiente figura:

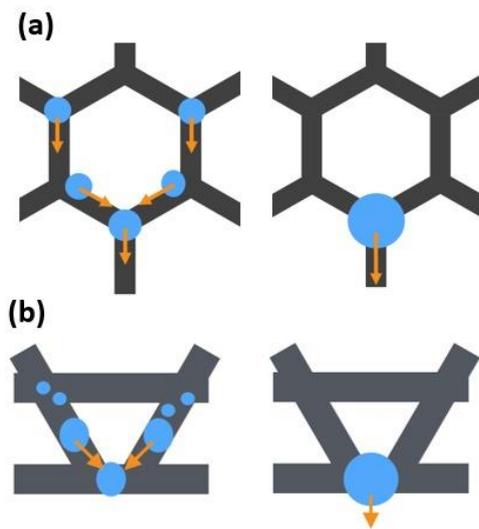


Figura 4.9 Recorrido de la gota y capacidad de acumulación de geometrías a) Hexagonales b) Raschel. Elaboración propia

Las capas diseñadas en ABS (figura 4.10a) y silicón (figura 4.10b), se pueden observar en la siguiente figura:

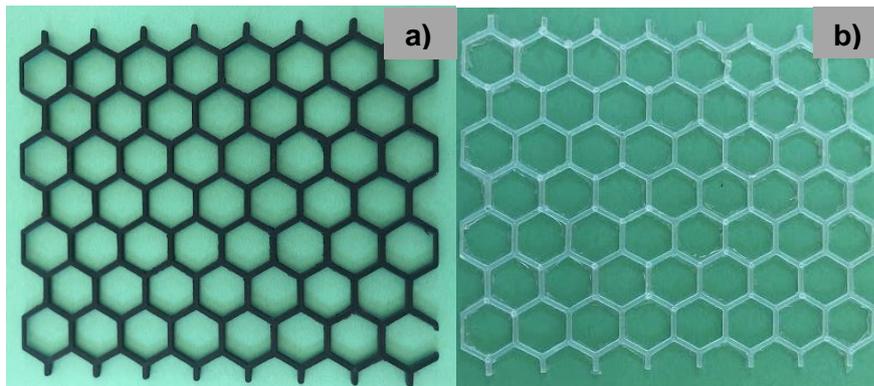


Figura 4.10 Capas hexagonales diseñadas a) ABS con fibra de carbono b) silicón. Elaboración propia

Por otra parte, las capas externas se deciden realizar con un patrón aleatorio, como resultado de la observación microscópica MEB de la *T.usenoides*. En donde se logró apreciar que las plantas están cubiertas por una alta densidad de tricomas multicelulares que se encuentran traslapados de forma irregular, lo que permite asegurar una cobertura total de tricomas en cada hoja, aumentando así la probabilidad de que las gotas de agua que rocen la planta puedan ser absorbidas y aprovechadas. Pero, además, la macroestructura de la bromelia tiene hojas y tallos traslapados de forma desordenada (figura 2.14), que según Herpipich (2019) también cumple un papel importante en la distribución del agua, ya que permite el transporte de una hoja a otra y posteriormente los tricomas, que forma un indumento denso en las superficies, aprovechan ese movimiento de transporte externo, para la absorción hacia al mesófilo. En la siguiente figura se puede observar la capa externa en ABS con fibra de carbono (figura 4.11a) y en silicón (figura 4.11b).

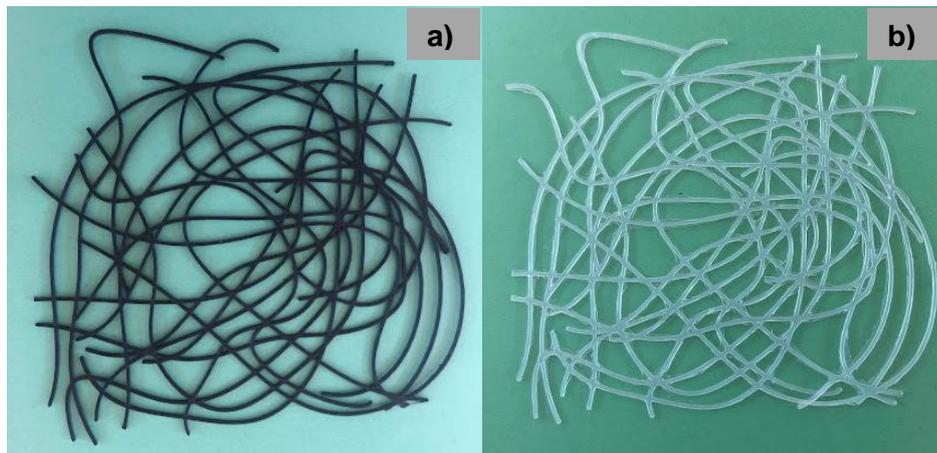


Figura 4.11 Capas aleatorias diseñadas en a) ABS con fibra de carbono b) silicón. Elaboración propia

Los dos tipos de capas se diseñaron para que transpuestas tuvieran un área de sombreado de 35%, ya que como se mencionó en la sección 2.1.1.3 Tecnología de Mallas, este porcentaje es el estándar utilizado para la recolección de neblina con las mallas comerciales de tipo Raschel. A este porcentaje se tiene suficiente área para capturar gotas de agua y a la vez suficiente espacio libre para permitir flujo de aire a través de la malla. Las dos configuraciones de las tres capas transpuestas se pueden ver en la siguiente figura, en donde se presenta a la izquierda la malla ASA (capas externas de ABS con fibra de carbono y capa interna de silicón) y a la derecha la malla SAS (capas externas de silicón y capa interna de ABS con fibra de carbono). Los diseños de todas las capas se encuentran a detalle en el Anexo A1: Capa externa, Anexo A2: Capa interna, Anexo A3 Marco de sujeción.

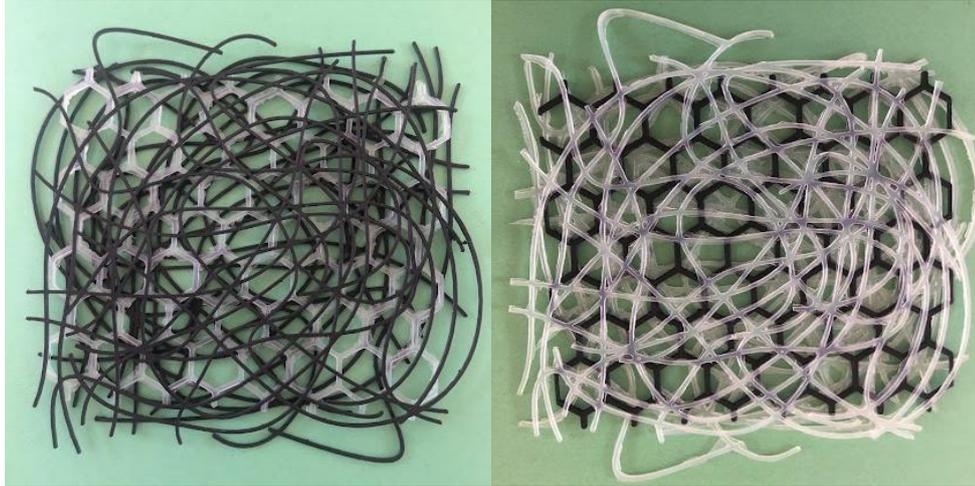


Figura 4.12 Mallas diseñadas a) ASA (ABS, silicón, ABS) b) SAS (silicón, ABS, silicón). Elaboración propia

Tanto la capa desordenada como la hexagonal tienen un perfil variado, ya que la cara frontal es plana, y las caras laterales se componen de microondas generadas por las capas de impresión 3D. En la siguiente figura se describe el perfil de las capas de silicón, donde la cara frontal en relación con el flujo de la neblina es plana y los lados se componen de 5 micro canales. El perfil tiene esta forma, por el molde que se utilizó para construir ambas capas de silicón. El molde fue impreso en 3D, donde cada capa de impresión mide aproximadamente $3\ \mu\text{m}$, por lo que se formaron los microcanales en el perfil del silicón de la misma longitud. Las dimensiones exactas de los canales se obtuvieron por medio del software Motic Images Plus 2.0 ML.

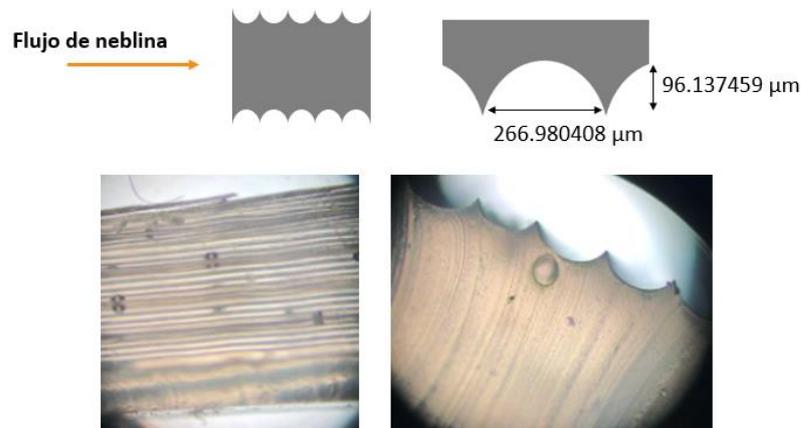


Figura 4.13. Perfil en capa de silicón (Fotos tomadas con Microscopio Óptico, Marca Motic, Modelo B410). Fuente: Elaboración Propia

De manera inversa, en las capas de material ABS con fibra de carbono se generó un perfil con micro crestas, ya que las capas se construyeron con impresión 3D. Cada micro cresta representa una capa de impresión. Similar al silicón, se formaron 5 micro crestas en el perfil lateral, cada una de casi $3\ \mu\text{m}$ de ancho. Estos perfiles con micro canales pueden promover la

canalización de las gotas hacia el recolector, de la misma manera que los canales de las alas de los tricomas promueven el desplazamiento de las gotas hacia las células centrales del tricoma.



Figura 4.14. Perfil en capa de ABS con fibra de carbono (Fotos tomadas con Microscopio Óptico, Marca Motic, Modelo B410). Fuente: Elaboración Propia

4.6 Mojabilidad de mallas prototipo

4.6.1 Prueba de ángulo de contacto en las mallas prototipo

Para determinar las características de mojabilidad de los materiales empleados para la realización de la malla de recolección, se realizaron pruebas con el goniómetro. Se puede observar que en la figura 4.15a, que corresponde al material de ABS con fibra de carbono, cómo el ángulo entre la gota y la superficie corresponde a 81.5 ± 5 . Se observa que la gota no se ve completamente formada y que está asentada sobre la superficie. Por otra parte, la figura 4.15b, que corresponde a la gota de agua destilada sobre la superficie de silicón, tiene un ángulo de contacto de 118.5 ± 9 , y la gota está más formada.

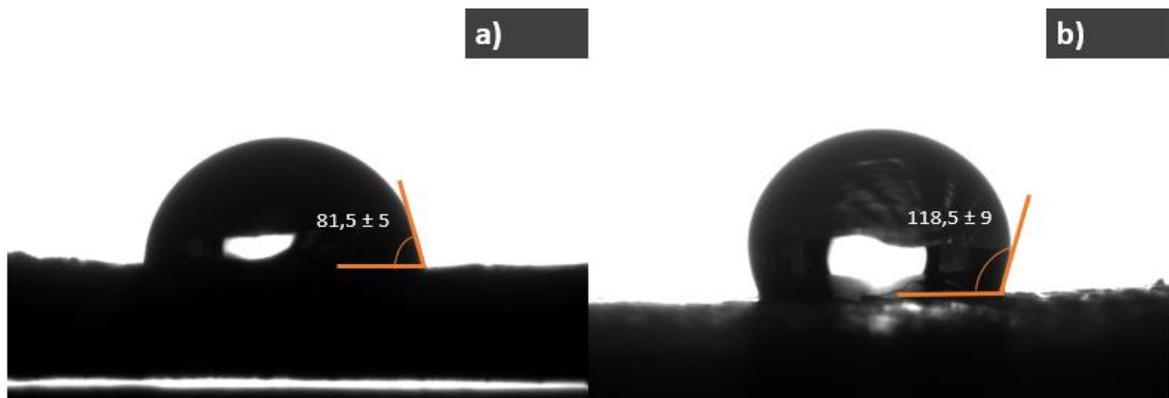


Figura 4.15. Ángulo de contacto en superficie a) de ABS con Fibra de Carbono y b) de silicón

Para ambos materiales se tienen 3 superficies interfaciales que se detallan a continuación en el siguiente cuadro:

Cuadro 4.4 Superficies interfaciales entre los materiales estudiados

Superficie Interfacial	ABS con Fibra de Carbono	Silicón Genérico
Sólido - Líquido	ABS con fibra de carbono + Agua destilada	Silicón + Agua Destilada
Sólido - Aire	ABS con fibra de carbono + Aire	Silicón + Aire
Líquido Aire	Agua Destilada + Aire	Agua Destilada + Aire

Se tiene que para el caso del ABS con fibra de carbono (Figura 4.15a), el ángulo de contacto al ser menor a 90° , se clasifica como un material que tiene características hidrofílicas, sin embargo, al estar tan cercano a 90° , su grado hidrofiliidad no es tan alto. Las superficies de alta mojabilidad (hidrofílicas) permiten que la gota se absorba rápidamente ya que se esparce con mayor velocidad sobre esta, lo que aumenta el área de contacto entre ella y el líquido, por esta razón es que se puede observar que la forma de la gota es más asentada.

Por otra parte, se observa que, para el caso del silicón, (Figura 4.15b) el ángulo de contacto entre la superficie y la gota al ser mayor a 90° se clasifica como un material hidrofóbico. Para este caso se tiene una baja mojabilidad, es decir la gota mantiene más su forma casi esférica sobre la superficie. En este caso, las superficies de tensión superficial que interactúan sobre la gota no permiten su esparcimiento. Además, se debe de tomar en cuenta que la rugosidad de la superficie también tiene un impacto en el esparcimiento de la gota. Según indica Cassie Baxter, al aumentar la rugosidad, para el caso de una superficie hidrofóbica, se disminuye aún más su mojabilidad, lo que permite a la gota mantener más su forma esférica, ya que hay menos área de contacto entre ambos estados (Ahmad *et.al.* 2016). En este caso, debido a que el moldeo se hizo vertiendo el silicón en una placa impresa en 3D y la técnica de impresión fue FDM, se generan patrones en la superficie aumentando la rugosidad, como se explicó anteriormente.

Por último, además de los datos que ofrece Ahmad sobre la disminución de la mojabilidad con la rugosidad en general, se tiene que el polidimetilsiloxano, más conocido por PDMS, o silicón genérico es un material que además de ser conocido por su alta capacidad para repeler el agua (Owen, 2014), sin necesidad de agregar ningún recubrimiento, tiene la tendencia de volverse más hidrofóbico al presentar patrones en su superficie, como es el caso de la capa en estudio (Zorba *et.al.* 2006). Sin embargo, este comportamiento puede

variar al presentarse movimiento de las gotas sobre la superficie como se explicará en la siguiente sección.

4.6.2 Prueba de histéresis del ángulo de contacto para las mallas prototipo

Los resultados de los ángulos de contacto de histéresis permiten comparar la diferencia de mojabilidad entre cada tipo de perfil de las capas, además de la diferencia en mojabilidad de cada material. En la siguiente figura se observan las imágenes con las cuales se midió el ángulo de avance y el ángulo de retroceso. Para cada perfil y material se tiene una secuencia de tres fotografías tomadas cada 15 segundos de una misma gota de agua cayendo. Se puede evidenciar que la gota sobre el perfil plano de silicón (Figura 4.16 b) tiene la forma más esférica ya que el material es hidrofóbico. Pero, el comportamiento de la gota para el perfil con canales de silicón es bastante diferente, ya que tiene una forma mucho más elongada y su ángulo de contacto con la superficie aumenta. Esto se debe a que la gota se esparce a través de los canales que van en paralelo a la dirección de caída. Siguiendo el modelo de mojabilidad de Wenzel que establece que la rugosidad disminuye la hidrofobia, se puede concluir que el perfil con canales es menos hidrofóbico que el perfil plano de silicón (Wenzel, 1936). Para el material ABS con fibra de carbono se observa el mismo fenómeno (Figura 4.16 a y b) donde la gota en el perfil con canales se alarga un poco más que en el perfil plano.

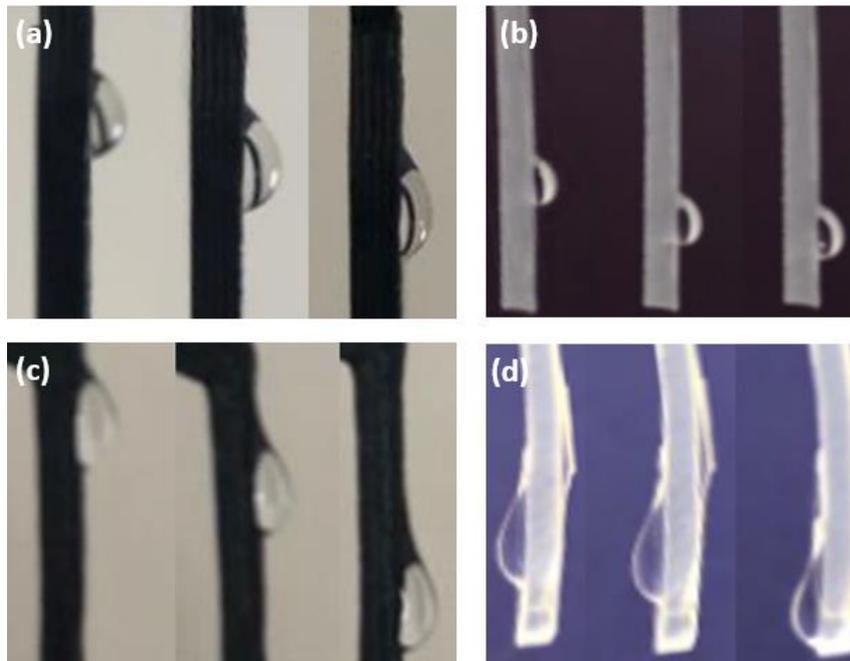


Figura 4.16. Forma de la gota cayendo por intervalos de 15 segundos: a) Perfil con canales en ABS con Fibra de Carbono b) Perfil plano en silicón c)

Perfil plano en material ABS con fibra de carbono d) Perfil con canales en silicón. Fuente: Elaboración Propia

En el siguiente gráfico se presenta el ángulo de histéresis para cada material y perfil, que se obtuvo con la diferencia entre el ángulo de avance y el ángulo de retroceso de cada gota mostrada en la figura anterior.

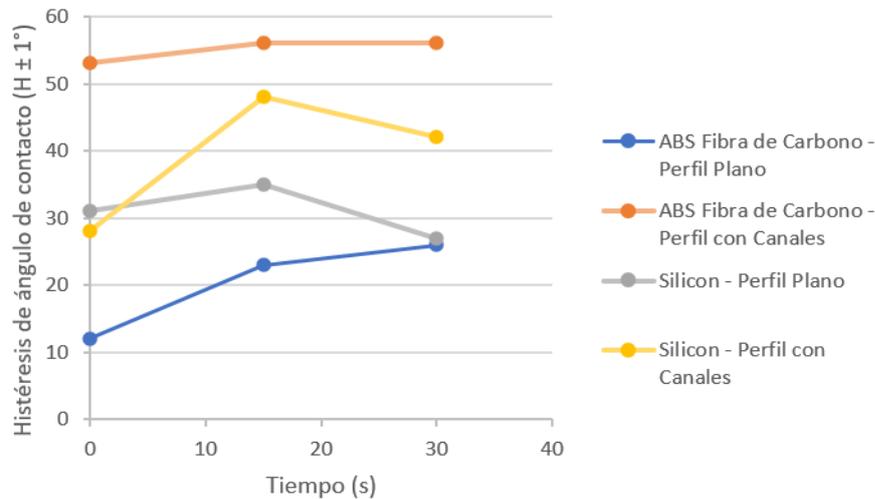


Figura 4.17. Gráfico de ángulo de contacto de histéresis de silicón y ABS con fibra de carbono en ambos perfiles

Se puede evidenciar que para ambos materiales el perfil con canales presenta un comportamiento más hidrofílico que para el perfil plano ya que la histéresis del ángulo de contacto es mayor. Entre los materiales, el ABS con fibra de carbono para el perfil con canales presenta el comportamiento más hidrofílico al tener un valor de histéresis del ángulo de contacto entre $53 \pm 1^\circ$ y $56 \pm 1^\circ$. Este comportamiento promueve mayor coalescencia de gotas, ya que al esparcirse más la gota a través de los canales se tiene menos distancia entre otras gotas, lo que facilita y acelera la coalición entre estas. La coalescencia es importante ya que las gotas al unirse en una sola más grande pueden vencer la fuerza de adhesión del material y caer más rápido por gravedad hacia el recolector de agua (Dai *et al.*, 2018). Además, la dirección de los canales ayuda a drenar la gota de agua hacia abajo (Knapczyk *et al.*, 2020).

4.7 Prueba de capacidad de recolección de agua de mallas prototipo y malla Raschel

Entre las mallas comerciales la malla Raschel ha probado ser de las más eficientes y las más utilizadas para colectores de neblina (Rajaram, *et. al.*, 2016), por lo que se optó por agregar

esta malla a la prueba para comparar su eficiencia con las mallas prototipo denominadas como ASA y SAS. A continuación, se presenta la gráfica con los resultados del peso de agua en gramos recolectado cada 5 minutos por cada malla. La malla Raschel logró recolectar más agua que las prototipo, con un total de 8.70 ± 0.01 g recolectados. La malla SAS recolectó un total de 7.70 ± 0.01 g y la malla ASA resultó la menos eficiente al recolectar 6.90 ± 0.01 g.

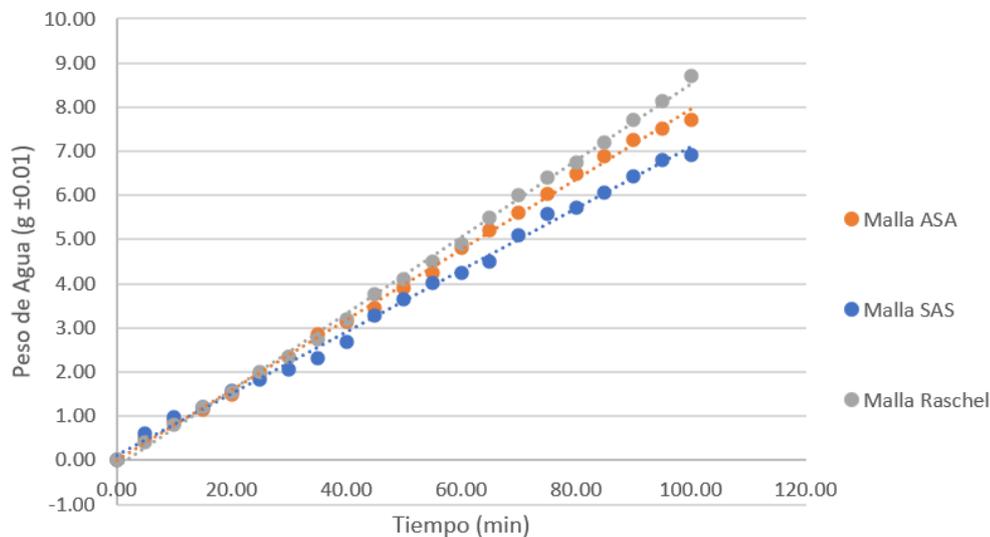


Figura 4.18. Gráfico recolección de agua por malla

Se tomó la pendiente lineal de cada curva del gráfico de la figura 4.18 para obtener la velocidad de recolección de agua en g/min. La malla Raschel resultó ser la más rápida en recolectar agua, luego la malla ASA y por último la malla SAS.

Cuadro 4.5 Resultados de velocidad de recolección de agua por malla

Malla	Velocidad (± 0.0001 g/min)
ASA	0,0794
SAS	0,0699
Raschel	0,0868

Para cada malla se midió el peso antes y después de la prueba de recolección de agua, para tener el peso de cada malla seca y mojada. De esta manera se puede conocer la cantidad de agua que quedó capturada en la malla al final de la prueba. Se denomina porcentaje de retención a la diferencia de peso seco y mojado entre el peso mojado. La malla ASA tiene el porcentaje de retención más bajo entre las tres mallas con un porcentaje de 12%. Este valor bajo se puede interpretar de manera positiva ya que al no retener tanta agua significa que la malla es eficiente en drenaje y las gotas se desplazan rápidamente hacia abajo.

Cuadro 4.6 Resultados de porcentaje de retención de agua por malla

Malla	Peso de malla mojada (g ±0.01)	Peso de malla seca (g ±0.01)	Porcentaje de retención (%)
ASA	65,30	57,20	12%
SAS	36,30	29,45	19%
Raschel	2,75	2,15	22%

A pesar de que la malla Raschel tiene un alto porcentaje de retención esto no se interpreta como baja eficiencia, ya que ésta es conocida por desplazar las gotas rápidamente hacia abajo por la naturaleza del material y su geometría triangular. El material de la malla Raschel tiene una mojabilidad parcial ya que está al borde de ser hidrofóbico, con un ángulo de contacto de $90 \pm 4^\circ$, que permite que la gota no sea absorbida por la malla, y más bien resbale a través del polipropileno (Knapczyk *et al.*, 2020). El alto porcentaje de retención se puede justificar por el hecho de que durante la prueba de recolección no había viento. En condiciones externas la malla estaría expuesta a vientos que ayudan a la eficiencia de la malla Raschel ya que el viento ayuda a desplazar las gotas a través de las fibras planas de la malla (Knapczyk *et al.*, 2020).

La malla SAS también se compone principalmente de material hidrofóbico, ya que las capas desordenadas que van al frente y atrás son de silicón. El alto porcentaje de retención se puede justificar por lo observado durante la prueba de humidificación. Se evidenció que las gotas de agua quedan adheridas sobre el silicón por mucho tiempo, y su desplazamiento no es tan rápido como en el caso de la capa desordenada de ABS de fibra de carbono en la malla ASA.

Se tomaron fotografías de las mallas para conocer la trayectoria de las gotas de agua y su distribución durante la prueba de humidificación. De la malla ASA se evidencia en la figura 4.19a que hubo gran acumulación de gotas en los filamentos horizontales de la primera capa o mejor conocida como la “capa desordenada”. Esta acumulación de gotas reduce la eficiencia de desplazamiento, ya que se debe esperar a que se acumule cierta cantidad para que entre ellas formen una gota lo suficientemente grande que pueda desplazarse hacia las intersecciones de los filamentos. En cambio, los filamentos con orientación vertical promueven por fuerza de gravedad el desplazamiento rápido hacia las intersecciones de la malla. Las intersecciones son los puntos claves de la malla donde las gotas colisionan entre sí para eventualmente caer sobre el recolector de agua, como se puede observar en la figura 4.19b.

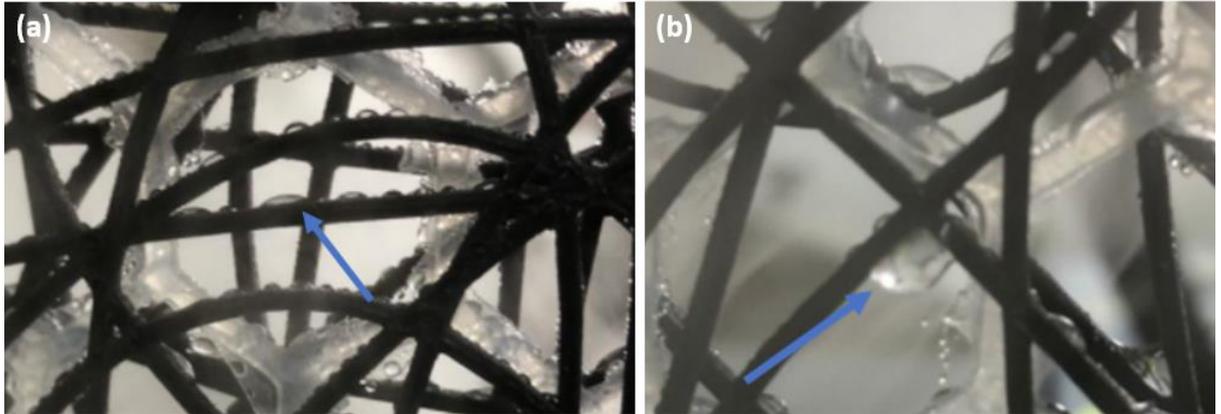


Figura 4.19. Trayectoria de las gotas de la capa desordenada de malla ASA. (a) Gotas en filamento horizontal de capa desordenada. (b) Gotas en intersección de filamentos de capa desordenada.

En el caso de la capa hexagonal colocada en medio de ambas capas desordenadas, la recolección sucede de manera similar, en donde las gotas por gravedad se desplazan hacia las intersecciones del hexágono. Esta geometría resulta ser bastante eficiente para promover el desplazamiento de la gota hacia abajo. Aun así, como se mencionó previamente, las gotas quedan más adheridas a esta capa de silicón que la capa desordenada de material ABS fibra de carbono. En la figura 4.20 se observan varias gotas grandes adheridas alrededor de todo el perfil de la capa de silicón de la malla ASA.



Figura 4.20. Gotas de agua en la capa hexagonal de malla ASA

En el caso de la malla SAS se observó el mismo comportamiento del silicón, donde las gotas quedan adheridas alrededor de todo su perfil y no se evidencia mayor desplazamiento de ellas en comparación a la malla Rachel y la malla ASA. La capa hexagonal ayudó a la eficiencia de recolección ya que la combinación del material ABS Fibra de Carbono y la geometría hexagonal es bastante eficiente. Esto se debe a lo previamente mencionado que el material hidrofílico con un perfil con canales promueve mayor coalescencia y drenaje de agua.

En la figura 4.21 se observa como las gotas se acumulan en las intersecciones del hexágono, en este caso en la figura 4.21a se evidencia la formación de una gota grande sobre el perfil con canales. En la figura 4.21b se observa una gota grande (producto de varias gotas que colisionaron) caer sobre la vertical de la malla hexagonal. Su forma alargada se debe a la hidrofiliidad del material, que aumenta el área de contacto con el filamento.

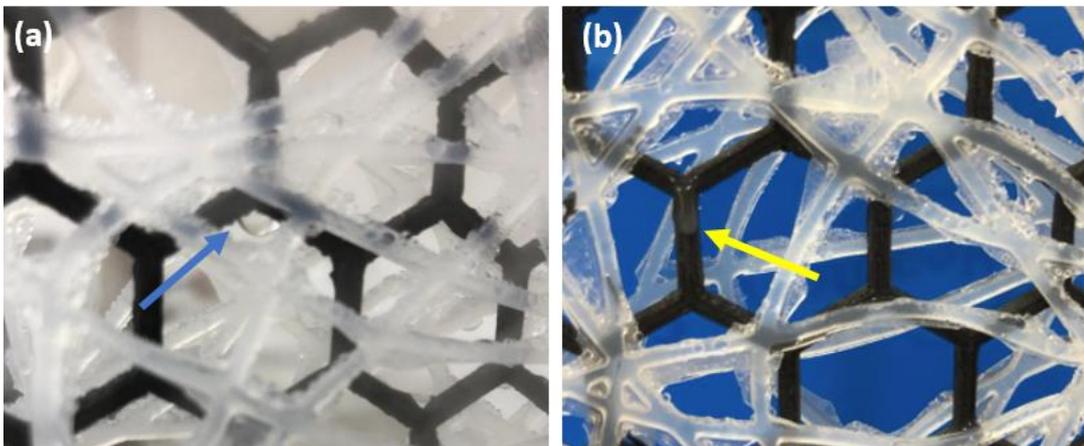


Figura 4.21. Gotas de agua en capa hexagonal de malla SAS: (a) Formación de gota en perfil con canales de capa hexagonal. (b) Formación de gota en perfil plano de capa hexagonal.

La malla Raschel al final de la prueba estaba cubierta de pequeñas gotas, a simple vista se evidenció mayor cantidad de gotas depositadas sobre la malla que en las mallas prototipo. Las gotas formadas en la malla eran de menor diámetro que las formadas en las mallas prototipo, a pesar de que estas se diseñaron con el mismo ancho de 1.6 mm.

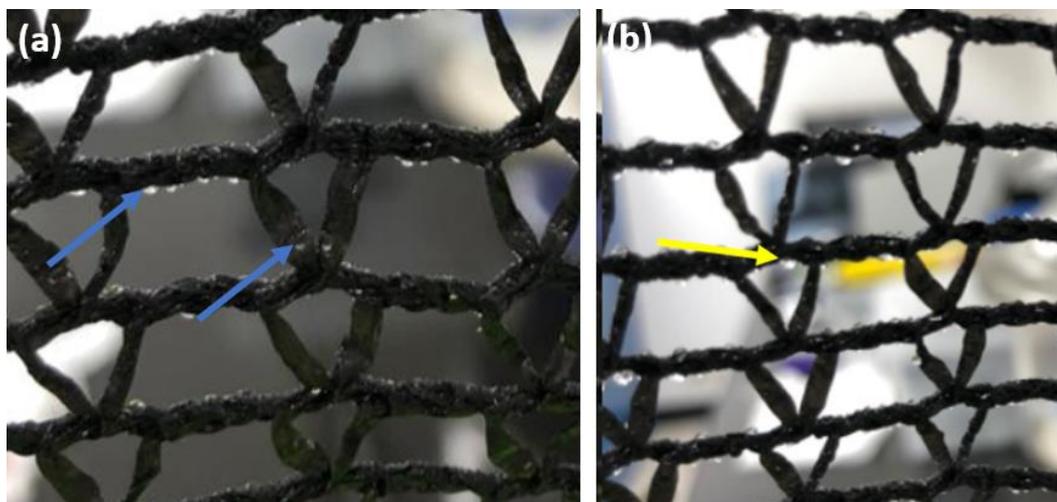


Figura 4.22. Trayectoria de las gotas de agua en la malla Raschel: (a) Formación de gotas en fibras triangulares. (b) Formación de gotas en fibras horizontales.

Para que una gota pueda desplazarse hacia abajo en una superficie sólida por fuerza gravitacional tiene que llegar a un tamaño específico que supere su longitud capilar (Azad, A. *et*

al., 2015). Es favorable que las gotas formadas en la malla Raschel sean pequeñas, ya que la formación de gotas grandes en una malla recolectora puede reducir la eficiencia al crear obstrucción. El material de la malla permite que estas resbalen con facilidad. En cambio, se observó en las imágenes previas que para las mallas prototipo se tienen que formar gotas de diámetro incluso mayor a los 1.6 mm en las intersecciones de ambas geometrías (capa desordenada o hexagonal) para que esta pueda desplazarse por gravedad hacia abajo.

Otra razón por la cual la malla Raschel tuvo mayor recolección de agua que las prototipo es por el perfil del filamento. Esta malla tiene un perfil plano en las fibras triangulares, lo que evita la acumulación de gotas a los lados del filamento. La mayoría de las gotas que son captadas por esta malla, pueden caer rápidamente por gravedad. A diferencia de ambas mallas prototipo que acumularon muchas gotas en el perfil superior de los filamentos horizontales de las capas horizontales. No se optó por hacer un filamento más delgado, ya que resultaría ser muy frágil, aumentando el riesgo de que se quiebre al ser expuesta a fuertes vientos.

La diferencia entre la malla ASA y la SAS es que la ASA tuvo mayor recolección de agua por tener la capa desordenada de material ABS con fibra de carbono, que resultó ser más efectivo para desplazar las gotas. Su perfil a los lados con micro canales permitió que se desplacen con más facilidad las gotas capturadas en estos lados. En cambio, la capa desordenada de silicón obtuvo menos desplazamiento, aun teniendo un perfil de micro canales a sus lados.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones y aportes de este trabajo

Se estudiaron dos especies de bromelias del género *Tillandsia*, con el fin de basar el diseño de las mallas multicapas en la especie más eficiente para la recolección de agua. Con lo que respecta a la prueba de humidificación y sumersión, se concluye que la *T.usneoides* tiene mayor capacidad de recolección de agua que la *T.schiedeana*, sin embargo, la razón por la cual presentó mejor capacidad de absorción no es concluyente, ya que al hacer la prueba de mojabilidad con el goniómetro, no se pudieron obtener los datos de los ángulos de contacto.

Para comprender la microestructura de la planta se observaron las hojas de *T.usneoides* por medio del MEB. Se destacó de las observaciones que la hoja se compone de una alta densidad de tricomas. Además, se observó que los tricomas se encuentran traslapados, evitando superficies sin cobertura de estos. Se resalta la morfología de las alas que cuenta con micro-canales, como mecanismo para el transporte de agua hacia las células del disco.

Con respecto a la evaluación de los tres tipos de mallas comerciales, se obtuvo mayor eficiencia de recolección con la malla Raschel, debido a su geometría triangular que permite la acumulación de gotas en las intersecciones, evitando que se obstruyan los poros de la malla lo cual dificultaría la recolección de gotas futuras, además favorece el deslizamiento descendente de las gotas por fuerzas de gravedad. Basado, en bibliografía anterior se opta por emplear además un área de sombreado de 35% que contribuye en la aerodinámica del flujo de aire. La malla comercial con menor capacidad de recolección corresponde a la de fibra de vidrio, dado que su geometría es compuesta por cuadrados, que fomentan la acumulación de las gotas en el poro y que se queden estancadas allí por la base horizontal del cuadrado.

A partir de la caracterización de la *T.usneoides* se optó por diseñar mallas compuestas de tres capas para simular el traslape de los tricomas. Este traslape promueve el desplazamiento de las gotas de agua capturadas, ya que disminuye la fuerza de absorción ejercida sobre ellas. Se quiso imitar este efecto al generar tres capas de dos geometrías diferentes, para obtener una estructura superpuesta. Las capas externas con geometría desordenada de manera aleatoria fueron inspiradas en la macroestructura de *T.usneoides*.

Por otra parte, con los resultados de las pruebas a las mallas comerciales, se optó porque las capas externas tuviesen una geometría hexagonal, basada en el principio de acumulación de gotas observado en la malla Raschel, lo cual dio buen resultado porque las gotas se acumulaban

en las intersecciones del hexágono y se desplazaban hacia abajo formando gotas de mayor tamaño. Al mantener el mismo porcentaje de sombreado que la malla Raschel, se buscó que la aerodinámica del flujo del aire no se viera afectada y que el flujo pudiese pasar a través de la malla y no alrededor de la misma. Además, al tener tres capas superpuestas, en vez de un único plano, si una gota no lograba quedar atrapada en la primera capa, se logró observar que esta podía ser capturada en las capas adyacentes.

Fundamentado en las pruebas de recolección de agua para las capas diseñadas y la malla Raschel, se concluyó que esta última es la más eficiente de las utilizadas en el estudio. Entre las mallas diseñadas, denominadas como SAS (Silicón, ABS, Silicón) y ASA (ABS, silicón, ABS), la malla ASA resultó ser más eficiente que la SAS. Esto se debe al material ABS con fibra de carbono que resultó ser más eficaz para desplazar la gota y promover la coalescencia. La combinación del material hidrofílico y los micro canales ayudó al drenaje de la malla. Esto porque se formaba una película delgada de agua que fluye a través de los micro canales, que ayuda a resbalar las gotas más grandes que caen sobre el perfil ondulado. Este perfil fue inspirado en las alas del tricoma de la planta, que estos se componen de varios canales para promover el desplazamiento de la gota hacia el centro del tricoma.

Esta característica de los micro canales contribuye a la eficiencia de ambas mallas. Al tener los micro canales en dirección contraria al flujo del viento, se evita que la gota de agua se desprenda de la malla a causa del mismo flujo y por lo contrario se promueve el desplazamiento de la gota en dirección paralela a la malla. Sin embargo, el material silicón no contribuye a la eficiencia de recolección, ya que con las observaciones de la trayectoria de las gotas de agua se concluye que este material tiene una alta fuerza de adhesión, lo que no permite que las gotas se desplacen con tanta facilidad.

Por lo mismo la malla ASA probó ser más eficiente al ser compuesta mayoritariamente por ABS con fibra de carbono. Se puede concluir que la funcionalidad de la capa central de material silicón, es permitir que las gotas que logren ingresar a la malla de recolección queden adheridas en el material y no reingresen al flujo de aire.

5.2 Recomendaciones y trabajo futuro

Comprendiendo las características de los materiales empleados y lo investigado, se puede esperar mejores resultados de otro tipo de material hidrofóbico que permita que la gota de agua resbale con mayor facilidad que en el caso del silicón. De haber sido este el caso, existe la posibilidad de que la malla SAS sea más eficiente. Para ello, es necesario continuar con investigaciones que permitan evaluar el desempeño de mallas, según su mojabilidad y

experimentar con otro tipo de materiales hidrofóbicos con características aditivas distintas al silicón.

Con respecto al diseño, se puede mejorar la geometría de la capa desordenada al evitar tramos horizontales, ya que estos provocan que las gotas se asienten allí y no se deslicen hacia abajo, tampoco contribuyen al aumento del tamaño de la gota para que luego pueda ser desplazada por gravedad, lo cual limita la recolección del agua en la parte inferior del colector. El método de fabricación limitó el espesor de cada capa diseñada, por lo que no se pudo tener un espesor similar al de la malla Raschel, esto podría tener afectaciones aerodinámicas al poner a prueba la malla en mayores escalas. Sin embargo, aporta rigidez a la malla, que es favorable para condiciones de intemperie.

Idealmente se habría diseñado contemplando las características anteriormente expuestas y con un perfil con micro canales al frente y detrás de la malla, no solo de forma lateral, para mejorar su eficiencia de recolección. Finalmente, entre las características más importantes que se destacan de las mallas diseñadas, son: colocar 3 capas traslapadas que unidas tengan un coeficiente de sombreado de 35%, ya que esto permite que las gotas puedan quedar atrapadas en alguna de las 3 capas evitando que estas reingresen al flujo del aire. Se considera como un aporte significativo a la recolección, los microcanales en la textura de las capas, ya que estos promueven el deslizamiento de las gotas hacia abajo. Finalmente, se considera que la variación en mojabilidades es una forma de simular los mecanismos de absorción de las bromelias, que evitan la evaporación del agua una vez ingresada a su tricoma, Análogamente las capas externas al ser hidrofílicas incentivan a las gotas a adherirse al mallado y la capa interna hidrofóbica, incita a las gotas a quedarse dentro de la malla. Por último, se promueve mediante este trabajo, dar continuidad a investigaciones futuras por el alto potencial de recolección de agua de las mallas y la gran cantidad de posibilidades para variar su capacidad de recolección.

Bibliografía

- A. Raman, M. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, & Fan, S. (2014). Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight. *Nature*, pp. 515-540.
- Adams, W. W., & Martin, C. E. (1986). Morphological changes accompanying the transition from juvenile (atmospheric) to adult (tank) forms in the Mexican epiphyte *Tillandsia deppeana* (Bromeliaceae). *American Journal of Botany*, 73(8), 1207-1214.
- Ahmad, I., & Kan, C. (2016) A Review on Development and Applications of Bio-Inspired Superhydrophobic Textiles. *Materials*.
- Altamarino, T. (2014). *REFUGIADOS AMBIENTALES Cambio climático y migración forzada*. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú, pp. 49. Extraído de <https://www.corteidh.or.cr/tablas/r37751.pdf>
- Ang, B., Hawai Yap, C., Vincent Lee, W., & Xue, J. (2018) Bioinspired Dual-Tier Coalescence for Water-Collection Efficiency Enhancement. *Langmuir*, pp 13409-13415.
- Azad, A., Ellerbrok, D., Barthlott, W., Koch, K. (2015). Fog Collecting biomimetic surfaces: Influence of microstructure and wettability. *Bioinspiration & Biomimetics*. Vol. 10.
- Azad, A. (2016a). History of Fog Collection: Fog Collection on Plant Surfaces and Biomimetic Applications. *University of Bonn, Germany*, 8. Extraído el 13 de abril de 2020 de <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2016/4393/4393.pdf>
- Azad, A. (2016b). Hierarchical surface architecture of plants as an inspiration of biomimetic fog collectors: Fog Collection on Plant Surfaces and Biomimetic Applications. *University of Bonn, Germany*, 59-78. Extraído el 13 de abril de 2020 de <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2016/4393/4393.pdf>
- Azzi, DE., & Beyrouthy ME., (2015) How Emerging Technologies and Biomimicry can Help Solving Water Problems: Desert case Studies. *Adv Crop Sci Tech*.
- Bai, H., Tian, X., Zheng, Y., Ju, J., Zhao, Y., & Jiang, L. (2010). Direction Controlled Driving of Tiny Water Drops on Bioinspired Artificial Spider Silks. *Advanced Materials*, 22(48), 5521-5525. <https://doi.org/10.1002/adma.201003169>
- Barthlott, W., Mail, M., Bhushan, B. & Koch, K. (2017) Biomimetics and Bioinspired Surfaces. *Springer Handbook of Nanotechnology*, pp. 1284-1290.
- Benzing, D., Henderson, K., Kessel, B., & Sulak, J. (1976). The Absorptive Capacities of Bromeliad Trichomes. *American Journal of Botany*, Vol. 63, pp. 1009-1014. Extraído el 8 de junio del 2020, de www.jstor.org/stable/2441760
- Brighigna, M.R. Palandri, M. Giuffrida, C. Macchi & G. Tani (1988) Ultrastructural Features of the *Tillandsia Usneoides* L. Absorbing Trichome During Conditions Moisture and Aridity, *Caryologia*, 41(2), 111-129. <https://doi.org/10.1080/00087114.1988.10797853>

- Brown, P., & Bhushan, B., (2016) Bioinspired materials for water supply and management: water collection, water purification and separation of water from oil. The Royal Society. Extraído el 26 de mayo del 2020 de <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0135>
- Chen, K. (2016). Beetles & *Stipagrostis sabulicola* – Water harvesting in arid area. Kelvinchenblog. <https://kelvinchenblog.wordpress.com/2016/02/03/beetles-stipagrostis-sabulicola-water-harvesting-in-arid-area/>
- Clus, J. Ouazzani, M. Muselli, V.S. Nikolayev, G. Sharan, & D. Beysens. (2009) Comparison of various radiation-cooled dew condensers using computational fluid dynamics. *Desalination*, Vol. 249, pp. 707-712. Extraído el 14 de mayo del 2020 de <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.033>.
- Comanns, P. (2018). Passive water collection with the integument: mechanisms and their biomimetic potential. *The Journal of Experimental Biology*, 221(10), 1-14. <https://doi.org/10.1242/jeb.153130>
- Comanns, P., Esser, F. J., Kappel, P. H., Baumgartner, W., Shaw, J., & Withers, P. C. (2017). Adsorption and movement of water by skin of the Australian thorny devil (*Agamidae: Moloch horridus*). *Royal Society Open Science*, 4(9). <https://doi.org/10.1098/rsos.170591>
- Dai, X., Sun, N., Nielse, S., Boschitsch, B., Wang, J., Yang, S. (2018). Hydrophilic directional slippery, rough surfaces for water harvesting. *Science Advances*, Vol 4. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aag0919>
- De Buys, A. (2014) SAEON takes up the challenge of investigating fog precipitation. *South African Environmental Observation Network*. Extraído el 29 de marzo de 2020 de <http://www.saeon.ac.za/enewsletter/archives/2014/august2014/doc01>
- Doltsinis, S., Krestenitis, M., & Doulgeri, Z. (2020). A Machine Learning Framework for Real-Time Identification of Successful Snap-Fit Assemblies. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 17(1), 513–523. <https://doi.org/10.1109/tase.2019.2932834>
- Domen, J. K., Stringfellow, W. T., Camarillo, M. K., & Gulati, S. (2013). Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 16(2), 235-249. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0645-z>
- Evans, D. (2015). *How to Design Snap Fit Components | Fictiv - Hardware Guide*. FICTIV. <https://www.fictiv.com/hwg/design/how-to-design-snap-fit-components>
- Farmer, D. K., Cappa, C. D., & Kreidenweis, S. M. (2015). Atmospheric Processes and Their Controlling Influence on Cloud Condensation Nuclei Activity. *Chemical Reviews*, 115(10), 4199-4217. <https://doi.org/10.1021/cr5006292>
- Ferretica Limón. (s. f.). *Cedazos plásticos*. Recuperado octubre de 2020, de <https://www.ferreticalimon.com/product/cedazo-plastico-verde-mozquito-1-mts>
- Fessehaye, M., Abdul-Wahab, S. A., Savage, M. J., Kohler, T., Gherezghiher, T., & Hurni, H. (2014). Fog-water collection for community use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 54–55. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063>
- Garrod, R. P., Harris, L. G., Schofield, W. C. E., McGettrick, J., Ward, L. J., Teare, D. O. H., & Badyal, J. P. S. (2007). Mimicking a *Stenocara* Beetle's Back for Microcondensation Using

Plasmachemical Patterned Superhydrophobic–Superhydrophilic Surfaces. *Langmuir*, 23(2), 689-693. <https://doi.org/10.1021/la0610856>

Genc, S., Messler, R. & Gabriele, G. (1998) A Systematic Approach to Integral Snap-Fit Attachment Design. *Research in Engineering Design*, Vol. 10, pp. 84-93.

Gioda, A., Hernández, Z., Gonzáles, E., & Espejo, R. (1995). Fountain trees in the Canary Islands: Legend and reality. *Advances in Horticultural Science*, 9(3), 114. Extraído 29 de marzo de 2020 de www.jstor.org/stable/42881349

Glickman, T. S. (2000). *Glossary of Meteorology, Second Edition (2.a ed.)*. Boston, Massachusetts: American Meteorological Society.

Godman, L. (2004). Bromeliads. Lloyd Godman. <https://www.lloydgodman.net/Photosynthesis/PHoToS/Tiians/schiedeana.html>

Gu, H., Wang, C., Gong, S., Mei, W., et al. (2016) Investigation on contact angle measurement methods and wettability transition of porous surface. *Surface and Coating Technologies*, Vol. 292, pp. 72-77.

Gómez, L., & Stone, D. (2008). Florula Digital - Páginas de Especies de Plantas. La Selva florula digital. Extraído el 29 de junio de 2020, de https://sura.ots.ac.cr/local/florula4/find_sp2.php?customer=Tillandsia+usneoides&busca=Buscar#

Hamed, A., Kabeel, A., Zeidan, E., & Aly, A. (2010). A technical review on the extraction of water from atmospheric air in arid zones. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 213-228.

Hanan-Alipi, A., Mondragón-Pichardo, J., & Vibrans, H. (2009, 16 agosto). *Tillandsia usneoides* - ficha informativa. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de La Biodiversidad México (CONABIO). <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/bromeliaceae/tillandsiausneoides/fichas/ficha.htm>

Herppich, W., Martin, C., Totzke, C., et al. (2019) External water transport is more important than vascular transport in the extreme atmospheric epiphyte *Tillandsia usneoides* (Spanish moss). *Plant, Cell & Environment*, Vol. 42, pp. 1645-1656. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30090-9>

Hwang, J., Jeong, Y., Park, J., Lee, K., Hong, J., & Choi, J. (2015). Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine. *Dovepress*, 10. <https://doi.org/10.2147/IJN.S83642>
IBC Solar: New module technologies: LHS, half-cut, MBB. (2018) Extraído el 20 de julio del 2020 de <https://blog.abc-solar.com/2018/09/new-module-technologies-lhs-half-cut-mbb/>

Industrial Laser Solutions. (2018, 26 septiembre). Femtosecond laser machining of functional surfaces. Extraído el 15 de mayo de 2020, de <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485176/femtosecond-laser-machining-of-functional-surfaces>

Ito, F., Komatsubara, S., Shigezawa, N., Morikawa, H., Murakami, Y., Yoshino, K., & Yamanaka, S. (2015). Mechanics of water collection in plants via morphology change of conical hairs. *Applied Physics Letters*, 106(13). <https://doi.org/10.1063/1.4916213>

- Jager, K., Isabella, O., Smets, A., Swaaij, R. & Zeman, M. (2014) Solar Energy. Delft University of Technology. pp. 340-360.
- Jarimi, H., Powell, R., & Riffat, S. (2020) Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz072>
- Ju, J., Bai, H., Zheng, Y., Zhao, T., Fang, R., & Jiang, L. (2012). A multi-structural and multi-functional integrated fog collection system in cactus. *Nature Communications*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms2253>
- Ju, J., Xiao, K., Bai, H., & Jiang, L., (2013) Bioinspired Conical Copper Wire with Gradient Wettability for Continuous and Efficient Fog Collection. *Advanced Materials*.
- Ju, J., Yao, X., Yang, S., Wang, L., Sun, R., He, Y., & Jiang, L., (2014) Cactus Stem Inspired Cone-Arrayed Surfaces for Efficient For Collection. *Advanced Functional Materials*, Vol. 24.
- Karnovsky, M.J. (1965) A formaldehyde-glutaraldehyde fixative of high osmolarity for use in electron microscopy. *J. Cell Biol.* 27: 137-8A.
- Khalil, B., Adamowski, J., & Shabbir. (2016) A. A review: dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors. *Sustainable Water Resources Management*, Vol 2. pp. 71-86. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0038-z>
- Knapczyk, J., Szewczyk, P., Ura, D., Bailey, R., Bilotti, E., Stachewicz, U. (2020). Improving water harvesting efficiency of fog collectors with electrospun random and aligned Polyvinylidene fluoride (PVDF) fibers. *Sustainable Materials and Technologies*, Vol 25. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00191>
- Koch, K., & Barthlott, W. (2009). Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367(1893), 1487–1509. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0022>
- Kulasinski, K., Guyer, R., Keten, S., Derome, D. & Carmeliet, J. (2015). Impact of moisture adsorption on structure and physical properties of amorphous biopolymers. *Macromolecules* 48, 2793–2800.
- Kumar, M. & Yadav, A. (2016). Composite desiccant material “CaCl₂/Vermiculite/Saw wood”’: a new material for freshwater production from atmospheric air. *Applied Water Science*.
- Lag J. *et al.* (2008) Hygroscopicity, Hygroscopic Constant. *Encyclopedia of Soil Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Dordrecht.
- Larrain, H., Velásquez, F., Cereceda, P., Espejo, R., Pinto, R., Osses, P. & Schemenauer, R.. (2002). Fog measurements at the site “Falda Verde” north of Chañaral compared with other fog stations of Chile. *Atmospheric Research*, pp. 273-284.
- Li, J., & Cai, C. (2011). The carbon fiber surface treatment and addition of PA6 on tensile properties of ABS composites. *Current Applied Physics*, 11(1), 50–54. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2010.06.017>
- Makuti, O., Henschel, J., Kolb, H., Mtuleni, V., Siteketa, V., & Shanyengana, ES. (2004). Testing Fog Collectors in the Namib Desert. *Desert Research Foundation of Namibia*. Extraído de

https://www.researchgate.net/publication/289525949_Testing_Fog_Collectors_in_the_Namib_Desert

Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, & Instituto Meteorológico Nacional. (2012). *Mejoramiento de las capacidades nacionales para la evaluación de la vulnerabilidad y adaptación del sistema hídrico al cambio climático en Costa Rica, como mecanismo para disminuir el riesgo al cambio climático y aumentar el índice de Desarrollo Humano*. pp. 12-15
Extraído de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/AdaReHiCRCC/offline/download.pdf>

Mohamed, M., William, G.E. & Fatouh, M. (2017) Solar energy utilization in water production from humid air. *Solar Energy*, Vol. 148, pp. 98. Extraído el 13 de mayo de 2020 de <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-424a77fa-acce-3ac4-9880-658fa61d054f>

Morales, F., & Murillo, F. (2011, 4 abril). INBio - *Tillandsia schiedeana*. Atlas de la Biodiversidad de Costa Rica. <http://www.crbio.cr:8080/neoportal-web/species/Tillandsia%20schiedeana>

Morales, F., & Ocampo, M. (2012, 2 julio). INBio - *Tillandsia balbisiana*. Atlas de la Biodiversidad de Costa Rica. <http://www.crbio.cr:8080/neoportal-web/species/Tillandsia%20balbisiana>

Murakami, D., Jinnai, H., & Takahara, A. (2014). Wetting Transition from the Cassie–Baxter State to the Wenzel State on Textured Polymer Surfaces. *Langmuir*, 30(8), 2061-2067. <https://doi.org/10.1021/la4049067>

N. Agam, P.R. Berliner. (2006) Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments—A review, *Journal of Arid Environments*, Vol. 65, pp. 572-573. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.09.004>.

Nørgaard, T., & Dacke, M. (2010). Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles. *Frontiers in Zoology*, 7(1), 23. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-7-23>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura: UNESCO. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. pp. 1-164. Extraído el 20 de Marzo, 2020. de <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf>

Otitoju, T. & Ahmad, A. (2017) Superhydrophilic (superwetting) surface: A review on fabrication and application. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 47, pp. 19-40.

Owen, M. J. (2014). Silicone Hydrophobicity and Oleophilicity. *Silicon*, 9(5), 651–655. <https://doi.org/10.1007/s12633-014-9188-0>

Papierowska, E., Matysiak, W., Szatyłowicz, J., et al. (2018) Compatibility of methods used for soil water repellency determinations for organic and organo-mineral soils. *Geoderma*, Vol. 314, pp. 221-231.

Park, K.-C., Chhatre, S. S., Srinivasan, S., Cohen, R. E., & McKinley, G. H. (2013). Optimal Design of Permeable Fiber Network Structures for Fog Harvesting. *Langmuir*, 29(43), 13269-13277. <https://doi.org/10.1021/la402409f>

- Pierce, S. (2007). The Jeweled Armor of Tillandsia—Multifaceted or Elongated Trichomes Provide Photoprotection. *Aliso*, 23(1), 44-52. <https://doi.org/10.5642/aliso.20072301.06>
- Pierce, S., Maxwell, K., Griffiths, H., & Winter, K. (2001). Hydrophobic trichome layers and epicuticular wax powders in Bromeliaceae. *American Journal of Botany*, 88(8), 1371-1389. <https://doi.org/10.2307/3558444>
- PV Cells 101: A Primer on the Solar Photovoltaic Cell. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. (2019) Extraído el 20 de junio del 2020 de <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/pv-cells-101-primer-solar-photovoltaic-cell>
- Rajaram, M., *et al.* (2016) Enhancement of fog-collection efficiency of Raschel mesh using surface coatings and local geometric changes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. pp. 218-229. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.08.034>
- Ranabothu, S., Karnezis, L. (2005) Dynamic wetting: Hydrodynamic or molecular-kinetic? *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 288, pp. 213-221.
- Raux, P.S., Gravelle, S. & Dumais, J. (2020) Design of a unidirectional water valve in *Tillandsia*. *Nat Commun* 11, 396. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14236-5>
- Reyes, C., Griffiths, H., Rincón, E., & Huante, P. (2008). Niche Differentiation in Tank and Atmospheric Epiphytic Bromeliads of a Seasonally Dry Forest. *Biotropica*, 40(2), 168. Extraído de www.jstor.org/stable/30045457
- Sahagún, E. C., Torres, J. L. A., & García, C. R. (2017) Epífitas para neófitos: las bromeliáceas y sus fascinantes tricomas. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Yucatán, México. Extraído de https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2017/2017-03-09-Chavez-Andrade-yReyes-Los-tricomas-de-las-bromeliaceas-epifitas.pdf
- Sahagún, E. C., Torres, J. L. A., & García, C. R. Epífitas para neófitos: las bromeliáceas y sus fascinantes tricomas. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Yucatán, México, (2017). Extraído de https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2017/2017-03-09-Chavez-Andrade-yReyes-Los-tricomas-de-las-bromeliaceas-epifitas.pdf
- Sampurno Bruijnzeel, L., Eugster, W., & Burkard, R. (2005). Fog as a Hydrologic Input. *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, 559-582. <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa041>
- Shang, L., Fu, F., Cheng, Y., Yu, Y., Wang, J., Gu, Z., & Zhao, Y. (2016). Bioinspired Multifunctional Spindle-Knotted Microfibers from Microfluidics. *Nanomicro Small*, 13(4). <https://doi.org/10.1002/sml.201600286>
- Shanyengana, E. S., Henschel, J. R., Seely, M. K., & Sanderson, R. D. (2002). Exploring fog as a supplementary water source in Namibia. *Atmospheric Research*, 64(1-4), 251-259. [https://doi.org/10.1016/s0169-8095\(02\)00096-0](https://doi.org/10.1016/s0169-8095(02)00096-0)
- Sharan, G. Harvesting Dew with Radiation Cooled Condensers to Supplement Drinking Water Supply in Semi-arid Coastal Northwest India. *International Journal for Service Learning in Engineering*, (2011), Vol. 6, pp.130-150. Extraído el 12 de mayo 2020 de https://pdfs.semanticscholar.org/b82a/af77fca4b6ebf78923a86c82be4ff1a2ce24.pdf?_ga=2.172007139.1159766451.1589242182-927840708.1589242182

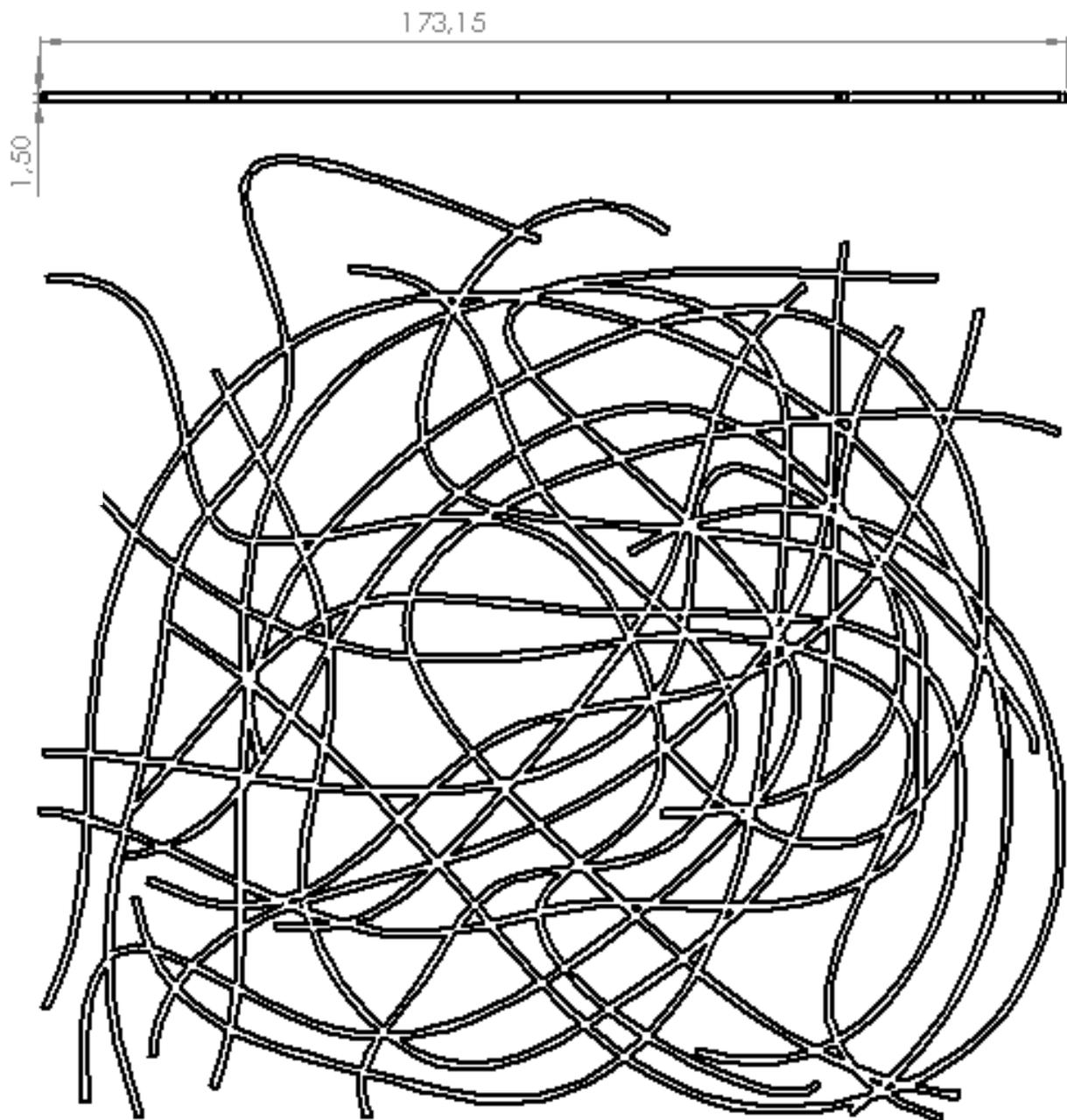
- Shimomura, M. (2010). The New Trends in Next Generation Biomimetics Material Technology: Learning from Biodiversity. *Quarterly Review*, 37, 1. Extraído de: <https://pdfs.semanticscholar.org/aaa8/806dba024d223c91d880b9f9e78601748b0a.pdf>
- Simpson, J., Aytug, T. & Hunter, S. (2015) Superhydrophobic materials and coatings: a review. *Reports on Progress in Physics*, Vol. 78.
- Stefano, M., Papini, A., & Brighigna, L. (2008). A new quantitative classification of ecological types in the bromeliad genus *Tillandsia* (Bromeliaceae) based on trichomes. *International Journal of Tropical Biology and Conversation*, 56(1), pp. 191-193.
- Thimmaiah, C., Panda, A.K., Pandey, U.K. et al. (2018) A New Approach to Compute the Porosity and Surface Roughness of Porous Coated Capillary-Assisted Low Pressure Evaporators. *Scientific Reports* 8, pp. 11708.
- Thomas, S. (2016) From Snap Fits to Adhesive: A Comprehensive guide to Mechanical Fastener Options. Extraído el 20 de junio del 2020 de <https://www.fictiv.com/blog/posts/from-snap-fits-to-adhesives-a-comprehensive-guide-to-mechanical-fastener-options>
- Tillandsia balbisiana* in Yamato Scrub area. (2009, 22 julio). Wikipedia. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tillandsia_balbisiana_20090722.jpg
- Tillandsia Usneoides*. (2005, 23 junio). Wikipedia. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tillandsia_usneoides03.jpg
- Tseng, M., & Wang, Y. & Jiao, R. (2018). Modular Design. *Encyclopedia of Production Engineering*.
- Vihaan, Y. (2020, 20 junio). *5 best 3D printer filaments for outdoor use*. 3DRIFIC. <https://3drific.com/best-3d-printer-filaments-for-outdoor-use/>
- Wang, Y., Zhang, L., Wu, J., Hedhili, M. N., & Wang, P. (2015). A facile strategy for the fabrication of a bioinspired hydrophilic–superhydrophobic patterned surface for highly efficient fog-harvesting. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(37), 18963-18969. <https://doi.org/10.1039/c5ta04930j>
- Wenzel, R. (1936) Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Mellon Institute of Industrial Research*. Vol. 28, pp. 988-990.
- White, B., Sarkar, A., & Kietzig, A.-M. (2013). Fog-harvesting inspired by the *Stenocara* beetle—An analysis of drop collection and removal from biomimetic samples with wetting contrast. *Applied Surface Science*, 284, 826-836. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.08.017>
- Xue, Y., Wang, T., Shi., Sun, L., & Zheng, Y. (2014) Water collection abilities of green bristlegrass bristle. *RSC Advances*. (77) pp. 40837-40840.
- Y. Tu, R. Wang, Y. Zhang, & J. Wang. Progress and Expectation of Atmospheric Water Harvesting, *Joule*, (2018), Vol. 2, pp. 1452-1453. Extraído el 13 de mayo de 2020 de <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.015>.
- Zheng, Y., Bai, H., Huang, Z., Tian, X., Nie, F.-Q., Zhao, Y., ... Jiang, L. (2010). Directional water collection on wetted spider silk. *Nature*, 463(7281), 640-643. <https://doi.org/10.1038/nature08729>

Zorba, V., Persano, L., Pisignano, D., Athanassiou, A., Stratakis, E., Cingolani, R., Tzanetakis, P., & Fotakis, C. (2006). Making silicon hydrophobic: wettability control by two-lengthscale simultaneous patterning with femtosecond laser irradiation. *Nanotechnology*, *17*(13), 3234–3238. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/13/026>

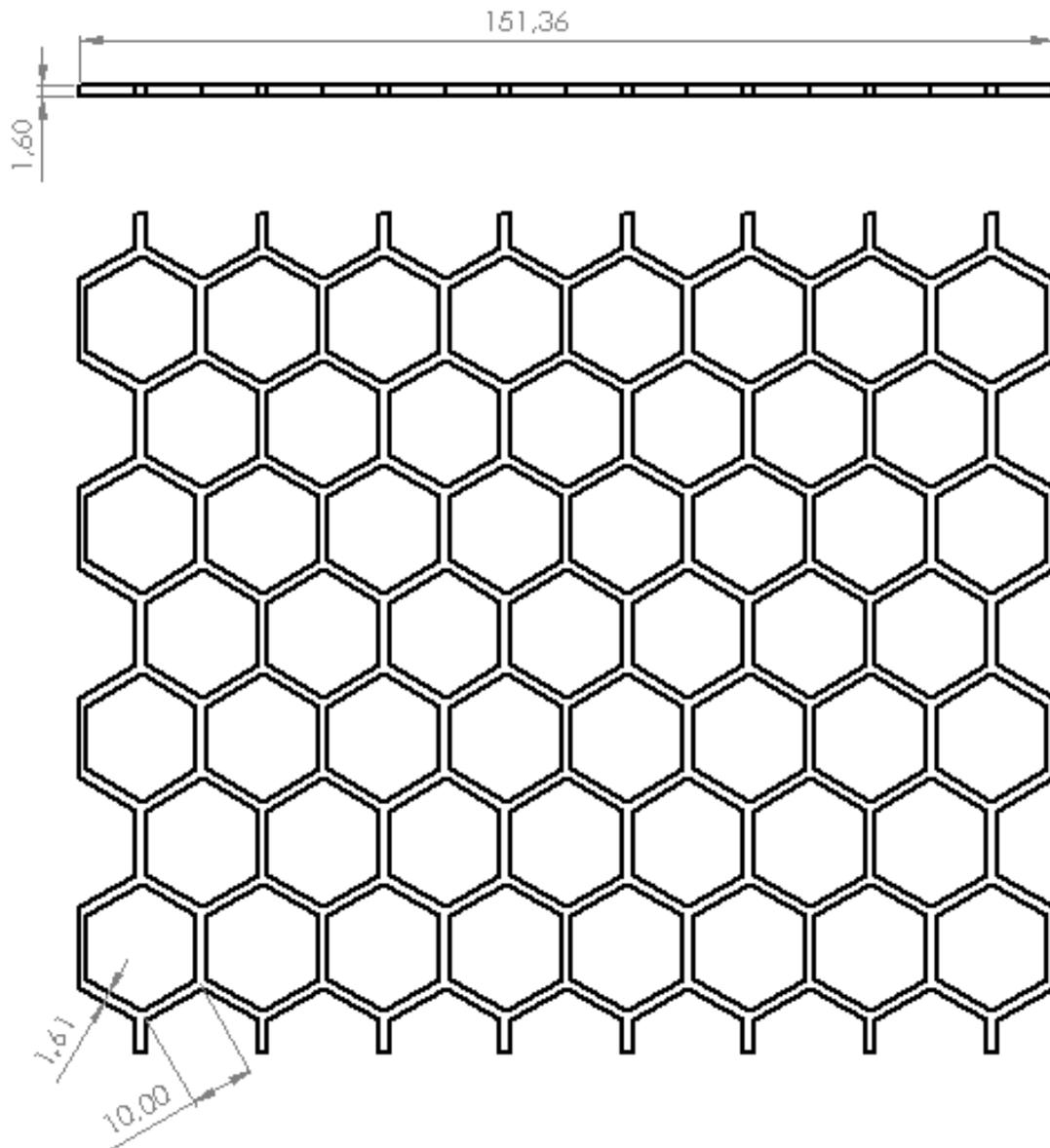
3DXTECH. (2021, 5 noviembre). *CarbonX™ High-Performance Carbon Fiber ABS+CF 3D Printing Filament | Made in the USA!* <https://www.3dxttech.com/product/carbonx-abs-cf/>

Anexos

Anexo A1: Plano de diseño de capa externa (desordenada) de la malla recolectora



Anexo A2: Diseño de capa interna (hexagonal) de la malla recolectora



Anexo A3: Marco de sujeción de malla recolectora

