

# Proskýnesis

soluzione biomimetica per  
contrastare la siccità

Lucrezia Piccari

Relatrice - Prof.ssa Silvia Barbero  
Corso di Laurea in Design e Comunicazione  
a.a. 2021-2022 Sessione di settembre 2022



Politecnico  
di Torino





# Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Design e comunicazione  
A.a. 2021/2022  
Sessione di Laurea settembre 2022

## ***Proskýnesis***

Soluzione biomimetica per contrastare la siccità

Relatrice  
Prof.ssa Silvia Barbero

Candidata  
Lucrezia Piccari



*“Ogni cosa che puoi immaginare, la  
natura l’ha già creata”*

Albert Einstein



# Indice

	<b>Abstract</b>	<b>9</b>
	<b>Introduzione</b>	<b>10</b>
<b>01</b>	<b>Che cos'è la biomimesi</b>	
	1.1 La natura come mentore, modello, misura	15
	1.2. Biomorfismo, bioutilization, biomimesi	19
	1.3. I pilastri della biomimesi	21
	1.4. Metodologie	28
	1.4.1. Bottom up	
	1.4.2. Top down	
	1.5. Linee guida per una progettazione biomimetica - la Spirale del Design	30
	1.6. I limiti della biomimesi	33
<b>02</b>	<b>La biomimesi nel design d'interni</b>	
	2.1. Metodologia di ricerca	37
	2.2. Casi studio	39
	2.3. Confronto dei risultati	46
<b>03</b>	<b>Generazione del concept di progetto</b>	
	3.1. Define - la sfida progettuale	53
	3.2. Biologize - dove rivolgere lo sguardo	55
	3.3. Discover - le specie da cui attingere	56



# Indice

3.4. Abstract - l'ambiente per cui si progetta	61
3.4.1. Punto di rugiada, rugiada, nebbia	
3.4.2. Uso dell'acqua dolce nel mondo	
3.4.3. Il clima in Italia	
3.5. Abstract - Analisi delle capacità del coleottero del Namib	67
3.5.1. Zone idrofobiche e idrofiliche	
3.5.2. Alta emissività IR	
3.6. Brief	72
3.6.1. Stato dell'arte - dispositivi per la raccolta di nebbia e rugiada	

<b>04</b>	<b>Progetto</b>	
	4.1. Selezione del materiale ad alta emissività IR	79
	4.2. Tabella esigenziale	84
	4.3. Presentazione componenti, materiali, interazioni e storyboard	87
	<b>Conclusione</b>	<b>98</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>100</b>
	<b>Sitografia</b>	<b>101</b>
	<b>Iconografia</b>	<b>104</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>107</b>



# Abstract

L'uomo oggi si trova davanti a una scelta, continuare a ignorare, o perlomeno a sottovalutare il suo impatto disastroso sull'equilibrio di questo pianeta, oppure fare un'inversione di rotta, tornando a un rapporto simbiotico e sinergico con la natura.

Il design può giocare un ruolo di rilievo nel guidare l'attuale e le future generazioni verso uno stile di vita più sostenibile. A tal proposito la tesi si propone di esplorare lo scenario attuale, le potenzialità e i limiti di un approccio progettuale bioispirato, da intendersi come una delle vie percorribili.

Nella prima parte della tesi si ripercorre l'evoluzione della biomimesi, dall'origine dell'umanità, fino ai giorni nostri, i principi che regolano questa disciplina e come questa può essere applicata in un qualsiasi ambito progettuale.

Nella seconda parte viene ristretto il campo di ricerca all'analisi dello stato dell'arte del design biomimetico nell'ambito della progettazione di interni. I casi studio vengono valutati soprattutto sul loro modo di imitare la Natura per la risoluzione di sfide progettuali.

La terza e la quarta parte sono invece dedicate allo sviluppo

di un progetto bifunzionale bioispirato inserito in uno spazio esterno, sia pubblico sia privato, finalizzato alla raccolta dell'acqua presente nell'aria prelevata tramite un processo di condensazione passivo, che quindi non necessita di un apporto di energia.

In particolare la terza parte contiene un'analisi delle variabili che influenzano il processo, nonché le diverse specie, parimenti animali e vegetali, da cui poter trarre ispirazione per le loro capacità di adattamento ad ambienti siccitosi.

La scelta è ricaduta sul coleottero del Namib, capace di sfruttare i fenomeni di nebbia e di umidità dovuti alla vicinanza dell'Oceano Atlantico per sopravvivere in uno dei deserti più aridi al mondo.

La quarta e ultima parte, invece, è interamente dedicata allo sviluppo del progetto, partendo dalle considerazioni emerse nei capitoli antecedenti.

La sua missione è di contribuire ad alleggerire le fonti tradizionali di acqua dolce della responsabilità di soddisfare la richiesta in ambito botanico, sia privato sia pubblico.

# Introduzione

Il progetto di tesi è il frutto di una scoperta di tre anni fa, quando per la prima volta sentii parlare di biomimesi, che ha determinato la mia scelta universitaria.

È mia convinzione, infatti, che nel connubio Uomo-Natura risieda la soluzione a questo periodo di crisi in cui i valori, le relazioni e il rispetto sono compromessi dal desiderio del profitto prima di tutto e dall'individualismo: la Natura, come inesauribile fonte di ispirazione per una convivenza più sostenibile, l'Uomo per la sua singolare capacità di astrazione e rielaborazione di ciò che lo circonda. In tal senso la parola crisi deve essere intesa con il suo significato greco di "opportunità", un punto di svolta per rivoluzionare in meglio il nostro stile di vita.

Nonostante le difficoltà date da una conoscenza ancora di nicchia della disciplina e dalla facile confusione con il biomorfismo, la progettazione bioispirata si sta diffondendo di anno in anno.

L'obiettivo della tesi è esplorare i principi fondamentali che

regolano questa disciplina, saggiandone le potenzialità fino alla sperimentazione diretta.

Nella prima parte della tesi si ripercorre l'evoluzione della biomimesi, inconsapevolmente antichissima, fino a giungere alla metodologia attualmente usata. Infatti da sempre l'Uomo si è ispirato alla Natura. Vengono inoltre investigate le metodologie utilizzabili e i principi che regolano la materia.

Nella seconda parte viene condotta un'analisi dello stato dell'arte della progettazione biomimetica in un ambito specifico quale il design d'interni, sondando fino a che punto la progettazione si sia spinta nella sua imitazione del mondo naturale.

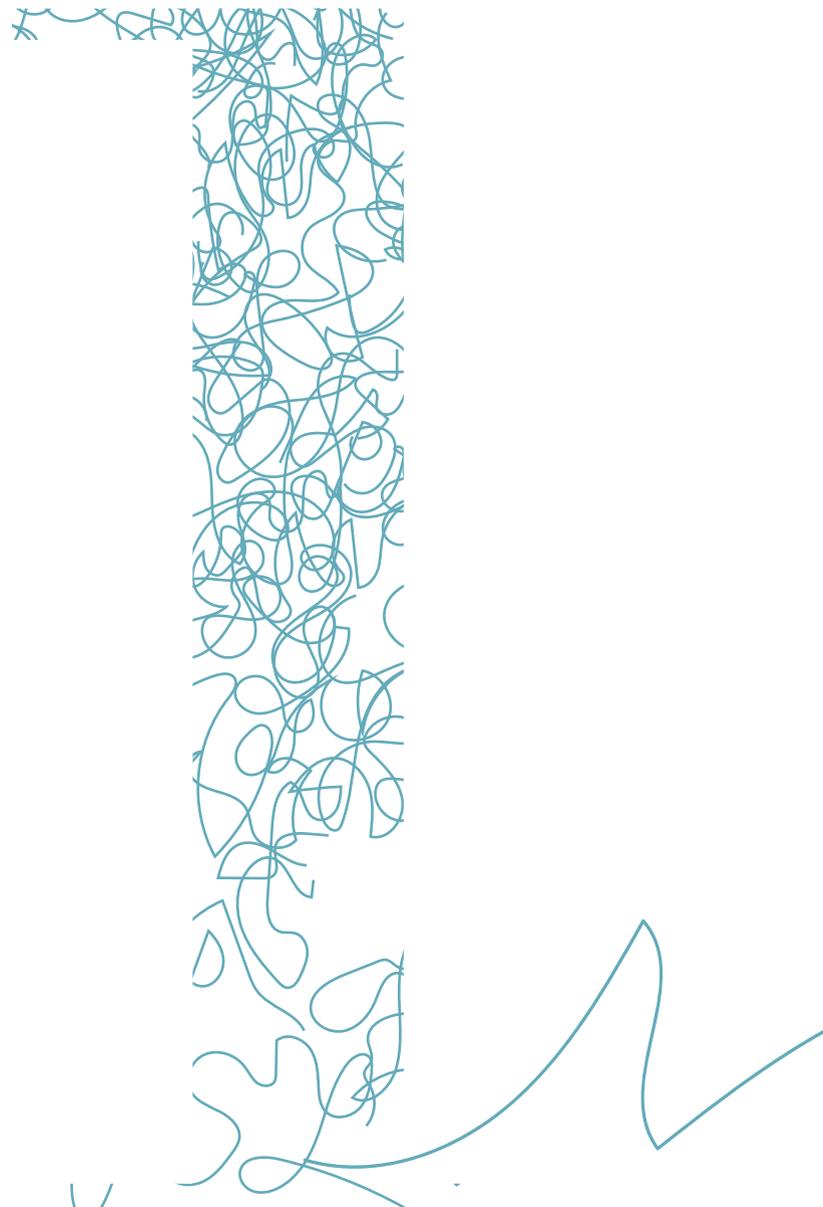
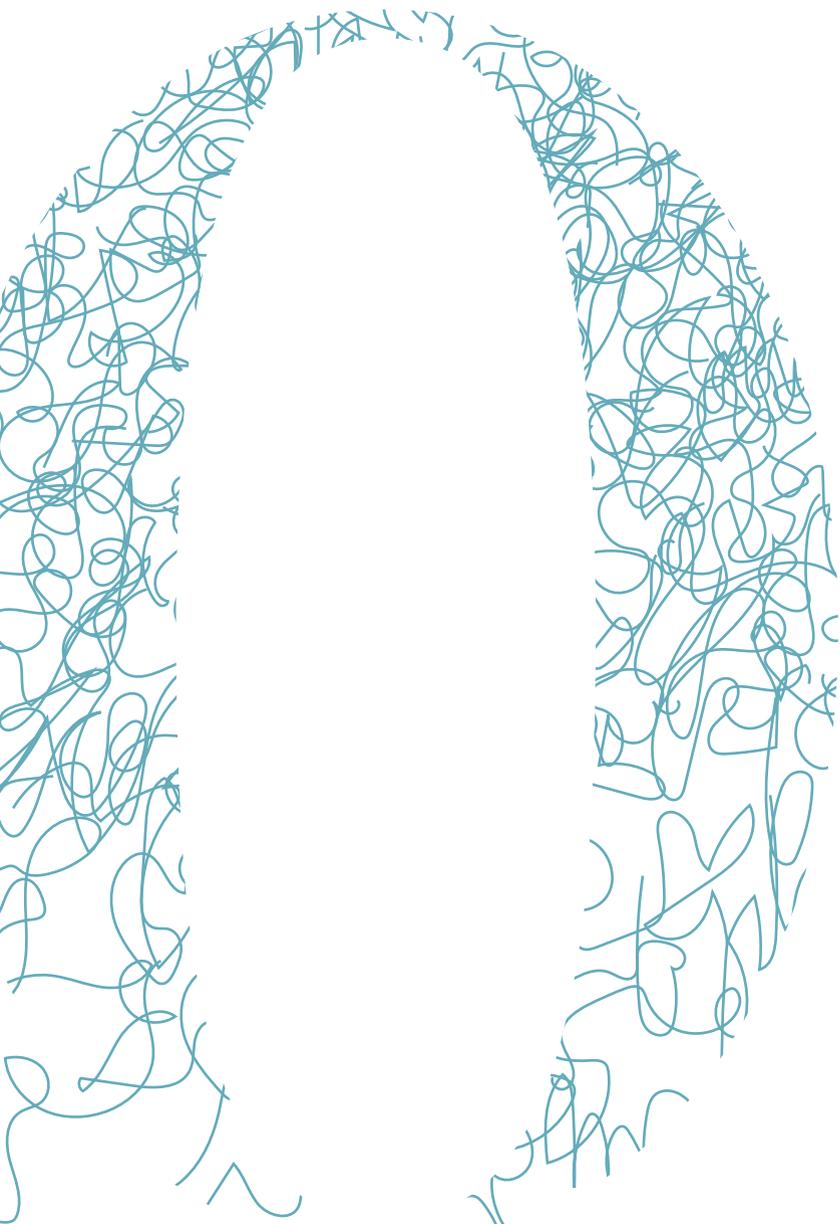
Nella terza e nella quarta parte si entra nel vivo della progettazione di un dispositivo biomimetico bifunzionale, ispirato al coleottero del Namib, in grado di ricavare acqua dolce dall'umidità dell'aria.

In particolare nella terza parte vengono esplorate la

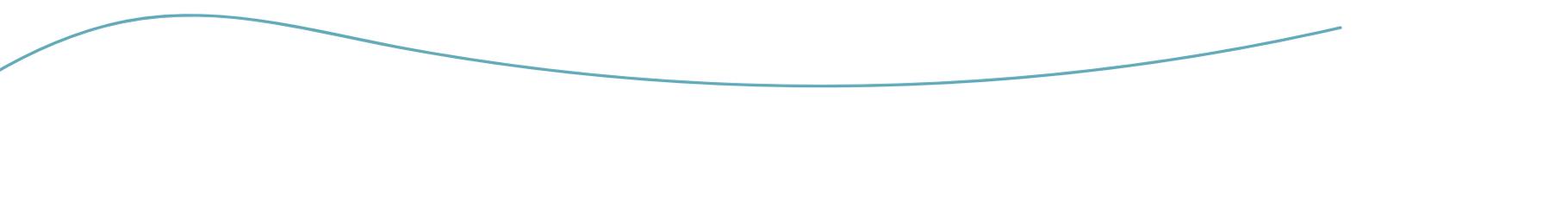
problematica da risolvere e le dinamiche da cui il fenomeno dipende: il punto di rugiada, la distribuzione e l'impiego di acqua dolce e le capacità sviluppate da diverse specie viventi, sia vegetali sia animali, per adattarsi ad ambienti estremamente siccitosi. Una volta selezionata la strategia a cui ispirarsi, ne è stato sviscerato il funzionamento, affinché

il processo di rielaborazione avesse luogo.

Infine tutte le informazioni ricavate sono confluite nella progettazione di un dispositivo bifunzionale per giardini pubblici e privati in grado di contribuire al raggiungimento del fabbisogno di acqua dolce.



**CHE COS'È LA  
BIOIMIMESI**





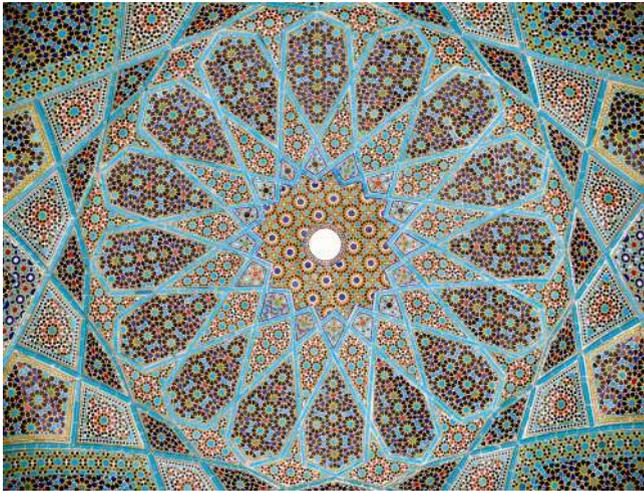
## 1.1 La Natura come modello, mentore, misura

L'Uomo ha sempre tratto ispirazione dalla Natura in maniera piuttosto intuitiva. L'Uomo è, in effetti, parte della Natura, non estraneo ad essa. Agli albori della civiltà umana, il mondo naturale era l'unico modello di realtà che si aveva a disposizione, talvolta amico, talvolta nemico, da consultare con i cinque sensi. Si pensa che le capanne prima, i tetti poi, siano ispirati alle fronde degli alberi, che le punte di frecce e lance siano una trasposizione di artigli, denti e spine, che le reti da pesca siano una versione macroscopica delle ragnatele. Almeno in modo involontario e intuitivo, la bioispirazione ha sempre accompagnato lo sviluppo della civiltà.

Anche il processo cosciente, volontario di consultare la natura non ha una vera e propria origine. Nella mitologia greca, ad esempio, già si trovano casi di progettazione bioispirata, come le ali realizzate in cera e piume da Dedalo per fuggire dal labirinto con il figlio Icaro. In generale i colori, i ritmi e le simmetrie che regolano la Natura hanno da sempre esercitato un potere ammaliante sull'uomo in quanto egli trova nella loro armonia motivo di sollievo e

distensione (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). Lo confermano le teorie gestaltiche riguardo all'influenza delle forme equilibrate sulla psiche umana. Lo stesso principio della classicità greca della *καλοκαγαθία* (kalokagathia), il bello che coincide con il buono, dà credito alla teoria secondo cui la bellezza percepita nella Natura risiede proprio nella sua coincidenza con la funzione (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009).

Il mistero di questa coincidenza forma-funzione ha esercitato a tal punto un'influenza sull'uomo da alimentarne la curiosità e renderla oggetto di analisi e trasferimento dei caratteri fenotipici agli artefatti, non solo come bioispirazione, ma anche a livello biomorfico (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). Nel primo caso si pensi al lavoro di Leonardo Da Vinci, iniziatore di una disciplina coscientemente bioispirata che, attraverso lo studio del volo degli uccelli, tentò di realizzare la prima macchina volante, l'ornitottero. Si pensi alle foglie di acanto sui capitelli corinzi, i motivi arabeggianti, come le piastrelle girih, i mandala buddisti. Lo stesso Owen Jones, nel



01. Mosaico sul soffitto della Tomba di Hafez, a Shiraz, da



02. Navata della Sagrada Família, da tradurrepeditoria.com

suo *The Grammar of Ornament*, pubblicato nel 1856, ripercorrendo i motivi decorativi usati dalle varie culture nei secoli, riconosce nell'ispirazione alla Natura il fil rouge delle varie civiltà e afferma “nei capitoli precedenti si è cercato di mostrare come, nei migliori periodi dell'arte, ogni decorazione sia basata sull'osservazione dei principi che regolano l'organizzazione delle forme in Natura, piuttosto che sul tentativo di imitare le forme naturali reali; e come, ogni volta che questo confine sia stato oltrepassato, in qualsiasi settore artistico, ciò si sia rivelato uno dei sintomi più forti di declino, dal momento che la vera arte consiste nel tradurre le forme della Natura in forme ideali, e non nel copiarle” (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). Se si ripercorre la storia degli artefatti, è possibile individuare un esplicito riferimento formale biologico, sfociato a cavallo fra Ottocento e Novecento in un riferimento che, come dice Maurizio Vitta, “andò oltre il semplice rinnovamento degli schemi di rappresentazione visiva del mondo e si dimostrò erede della tradizione organicista del design e dell'architettura del XIX secolo, che tuttavia superò

grazie al suo modo di assumere la Natura non solo come ispirazione formale, ma anche come modello strutturale e, più alla lontana, concettuale. Nel fitomorfismo e nel biomorfismo che ne costituirono l'impronta (...) si legge la lucidità di un'analisi che traduceva in valori estetici le più avanzate conquiste della scienza e della tecnica dell'epoca (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009).” Si prenda a esempio il processo di traduzione dei principi strutturali che regolano le piante nelle colonne che reggono la struttura della Sagrada Família di Antoni Gaudí, oppure le colonne dendriformi di Victor Horta per Hotel Tassel. Senza dimenticare il lavoro di Christopher Dresser, considerato il primo industrial designer della storia, figura poliedrica, studioso e insegnante di botanica che, traendo ispirazione dalla natura, definì il concetto di *adaptation* o *fitness*, con cui reclamò la necessità di anteporre l'utilità o adeguatezza allo scopo rispetto alla decorazione. Egli infatti afferma “nel regno vegetale si manifesta la massima aderenza allo scopo, e si sviluppano solo quelle forme che si accordano con i requisiti della situazione” (Salvia, Rognoli, & Levi,



03. Ragno tigre (*Nephila pilipes*), da esquire.com

2009).

Dopo un periodo di allontanamento con il Movimento Moderno, razionalista prima, minimalista poi, negli anni '70 esplose la necessità, nonché il desiderio dell'oggetto emozionale che sfrutta il richiamo esplicito al mondo naturale come elemento di attrazione dell'interesse del potenziale acquirente. In un qual modo, anche questa può essere definita bioispirazione. Infatti, nel mondo naturale, molte specie, vegetali e animali, sfruttano colori cangianti come linguaggio comunicativo (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). In alcuni casi viene usato come forma di seduzione e corteggiamento; è il caso del pavone, del leone, del germano reale. In altri casi avverte della propria tossicità ai possibili predatori, scemando così il loro interesse. Questa declinazione del colore, definita aposematismo, si ritrova nelle api, nelle coccinelle, in alcune tipologie di farfalla, nel pesce chirurgo e nel serpente corallo, per citare degli esempi. Viceversa, può essere usata come strumento per attrarre prede. È il caso del ragno tigre (*Nephila pilipes*), che presenta tipiche striature gialle per simulare il polline e

quindi attrarre più prede nella sua trappola.

È altresì vero che talvolta in Natura quelle che paiono essere caratteristiche decorative, in realtà non sono essenziali alla prosecuzione della specie, bensì sopravvivenze da precedenti adattamenti funzionali, il cui uso è divenuto obsoleto (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). La questione è ancora aperta poiché, se è comune convenzione che l'investimento energetico in Natura è sempre finalizzato alla sopravvivenza della specie, è probabile che la funzione di determinate forme, pattern, colori, abbia uno scopo ancora sconosciuto e per questo al momento considerato obsoleto. In alcuni casi, per esempio la decorazione viene usata per il riconoscimento del singolo individuo all'interno di un branco.

Da un'ispirazione puramente formale, basata su un condiviso riconoscimento nella Natura degli ideali di perfezione e bellezza, scaturisce il dubbio che si possa estrapolare un insegnamento più profondo della mera contemplazione ed emozionalità (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). A tale necessità risponde la biomimesi, che

entra in relazione con il mondo naturale ispirandosi su tre diversi livelli: la Natura come modello, mentore e misura. La natura è il modello da cui trarre ispirazione per indagare e identificare le strategie utili alla risoluzione di problemi con un approccio il più sostenibile possibile. Le domande da porre in questo caso sono “cosa e come fa la Natura?” (Benyus, Biomimicry - Innovation Inspired by Nature, 2002 ). Come fanno i Cactus a vivere in climi aridi? Cosa fanno i pinguini per resistere ai venti freddi dell’Antartide? È importante in questo caso definire il contesto in cui le specie operano al fine di identificare le strategie di adattamento adottate. Ma la Natura è anche mentore del processo esplorativo, è la guida da seguire nell’identificazione di principi etici che conducano a un vivere più sostenibile. “Perché la Natura lo fa?” è la domanda da porre (Benyus, Biomimicry - Innovation Inspired by Nature, 2002 ). Perché i rapaci planano? Perché le anatre volano in formazione a V? La difficoltà di questo approccio risiede nella capacità di osservazione, nel mettere in discussione fenomeni a cui si assiste quotidianamente

e ai quali non si presta più la dovuta attenzione. I comportamenti radicati nella quotidianità diventano delle sorta di *habitus*, degli schemi acquisiti che non si è in grado di valutare in modo oggettivo o con l’attenzione che meriterebbero perché ormai sono consolidati. Bisogna proprio partire da questi, dal momento che sono i più facilmente reperibili, per interrogare la Natura. La Natura però deve anche fungere da metro di misura, deve essere lo strumento attraverso cui le azioni e le scelte vengono valutate. Ponendosi la domanda “La Natura lo farebbe?”, emerge inevitabilmente quanto l’attuale stile di vita umano sia incompatibile con il contesto in cui è inserito (Benyus, Biomimicry - Innovation Inspired by Nature, 2002 ). La Natura consumerebbe più di quanto viene prodotto? La Natura brucerebbe o butterebbe nelle discariche preziosa materia prima, anziché riutilizzarla come risorsa? Partire da queste domande è essenziale per rivedere l’attuale stile di vita umano affinché questo possa essere convertito in uno più armonioso con le leggi e i ritmi naturali.

## 1.2 Biomorfismo, Bioutilization, Biomimesi

La collaborazione tra l'uomo e la Natura avviene su diversi livelli e segue dinamiche diverse, che non sempre possono essere definite biomimesi. Non tutto ciò che è ispirato al mondo naturale è biomimesi, poiché quest'ultima segue regole ben precise che la identificano e differenziano. In questa sede vengono esplorate le tre macrocategorie, accomunate dal prefisso "bio" che più spesso incorrono in fraintendimenti e confusioni: biomorfismo, *bioutilization*, biomimesi.

Se la biomimetica è basata sulla traduzione di principi biologici in tecnologie prodotte dall'uomo, la *bioutilization* sfrutta direttamente organismi o materiali biologici per un determinato scopo. Questa è particolarmente utile nei casi in cui la replica di complessi macchinari o processi biologici nelle tecnologie non ha successo, richiede troppo tempo o è troppo complessa per essere economicamente vantaggiosa. In questo caso organismi viventi o materiale biologico vengono usati in base alle loro innate caratteristiche per il raggiungimento di un

risultato. È il caso delle pareti verdi verticali per purificare l'aria di uffici o delle aree urbane, oppure di Ecovative Design che, utilizzando i miceli e gli scarti agricoli, come gli steli di mais, ha sviluppato un materiale compostabile come alternativa alla schiuma di plastica e ad altri materiali sintetici dannosi per l'ambiente. I miceli vengono coltivati sui rifiuti agricoli, formando una matrice che lega le fibre tra loro e dà origine a una massa solida per produrre imballaggi e materiali da costruzione (Bernett, 2015).

Il biomorfismo, invece, è un'ispirazione naturale limitata alla sfera visiva. Propone negli oggetti precise caratteristiche antropomorfe o zoomorfe con un intento ludico. Il decoro non assume funzioni pratiche, ma si limita a catturare l'attenzione e incuriosire l'animo dell'acquirente (Terenzi, Mecca, 2017). Viene comunemente criticato per la sua mancanza di aderenza ai principi biologici, che si traduce in progetti non necessariamente più performanti o sostenibili; tuttavia non bisogna sottovalutare i benefici che si ottengono a livello mentale da un'ispirazione biomorfica,



04. Imballaggi prodotti da Ecovative Design, da [atlasofthefuture.org](http://atlasofthefuture.org)

come confermano le teorie della Gestalt sugli effetti di distensione e rilassamento dati dalle forme naturali. La Great Room, ovvero lo spazio interno degli uffici dell'edificio amministrativo SC Johnson and Son progettato da Frank Lloyd Wright, è un esempio dell'influenza positiva che può esercitare sui dipendenti uno spazio dal design biomorfico. Le sue colonne dendriformi dal fusto sottile offrono infatti ai dipendenti protezione e senso di comunità al contempo, migliorando l'efficienza e l'ambiente lavorativo per il beneficio di tutti (Bennett, 2015).



05. Tavolo di Carlo Mollino, 1949, esempio di biomorfismo, da [sothebys.com](http://sothebys.com)

La biomimesi rappresenta un livello di lettura della Natura più profondo. Non è basata su ciò che è possibile estrarre dalla Natura, né si limita a un'imitazione di tipo formale, ma è fondata sulla comprensione, l'apprendimento e l'emulazione delle strategie utilizzate dagli esseri viventi con l'intento di creare progetti e tecnologie sostenibili (Bennett, 2015). Per citare Janine Benyus, cofondatrice del Biomimicry Institute, la biomimesi è "the conscious emulation of life's genius", la consapevole emulazione del genio della vita.

## 1.3 I pilastri della biomimesi

Per 3.8 miliardi di anni la Natura ha sperimentato le soluzioni più efficaci alla risoluzione di determinati problemi, selezionando le alternative più adatte ed eliminando quelle inadatte alla sopravvivenza di una specie in un dato contesto. La flora e la fauna attuali sono il frutto di un lento ma costante adattamento all'ambiente, anch'esso in continuo mutamento, in cui esse interagiscono. Infatti la vita di ogni essere vivente è connessa in modo indissolubile all'ambiente in cui esso è collocato. Tale interazione è basata su un equilibrio dinamico che richiede alle specie, nel corso delle generazioni, di adattarsi alle diverse esigenze al fine della sopravvivenza. Si può dire che il concetto di equilibrio dinamico sia alla base della vita stessa: un organismo sopravvive perché riesce a mantenere un equilibrio tra l'energia che accumula e quella che consuma, così come una specie sopravvive perché riesce a mantenere un equilibrio tra le risorse disponibili e il consumo che ne fa. Al fine della sopravvivenza in un simile contesto, un organismo deve costantemente trovare nuove soluzioni che portino all'ottimizzazione del consumo di

risorse o all'adattamento per poterne consumare di nuove (Buiatti, 2014); tuttavia ogni essere vivente si è evoluto per utilizzare determinate risorse in uno specifico ambiente o "nicchia", ossia il ruolo che una specie svolge all'interno del suo ecosistema e il modo in cui essa utilizza le risorse dell'habitat in cui vive (Treccani E., Nicchia ecologica, s.d.). Dall'osservazione dei fenomeni naturali si possono ricavare importanti lezioni. L'evidente biodiversità che popola questo pianeta suggerisce che non esistano soluzioni migliori in assoluto, bensì soluzioni più o meno adatte a uno specifico contesto. Così come le branchie consentono ai pesci di respirare sott'acqua, ma sulla terraferma sono inefficaci, allo stesso modo i polmoni sono una soluzione eccellente sulla terraferma, ma certamente temporanea in acqua. Le piante più carnose si sono evolute in ambienti aridi che richiedono un immagazzinamento di liquidi in vista dei periodi di siccità, mentre le piante che crescono nell'acqua contengono molta aria (Dresser, 1862). Anche senza prendere in esame esempi così estremi, il caso studio dei Fringuelli di Darwin è una celebre prova di

come, partendo da un progenitore comune, una specie sia in grado di differenziarsi. Questo fenomeno è chiamato radiazione adattativa. In questo caso sono prese in esame 13 specie che popolano le isole Galapagos e l'isola del Cocco. Questi volatili, caratterizzati da un piumaggio poco sgargiante, tipicamente nero o sulle tonalità del mattone, nonostante siano molto simili tra loro, presentano un becco di dimensioni molto variabili a seconda della dieta, che può essere frugivora o insettivora. La sua dimensione determina la tipologia di alimentazione e, di conseguenza, il comportamento e la porzione di isola occupata da ciascuna specie. La differenziazione riduce anche la competizione interspecifica, ovverosia la competizione instaurabile tra uccelli di specie diverse. Inoltre questa differenza formale influisce anche sul richiamo canoro, condizionando di conseguenza anche i comportamenti riproduttivi e, di conseguenza, la loro evoluzione e differenziazione (Ferrari, 2020). Lo stesso termine "nicchia" (dal latino *nidus*), intesa come cavità la cui funzione è legata a un'idea di accoglienza e protezione, suggerisce un principio rilevante del processo evolutivo che rimanda a una separazione, spesso di tipo geografico, che ha portato specie prossime a una vita evolutiva autonoma (Dawkins, 2011).

Un'altra lezione importante da tenere in considerazione risiede nel fatto che la naturale tendenza alla vita non sia mai rivolta verso una maggiore complessità, bensì verso un livello di adattamento ottimale che comporti

il minor consumo di risorse possibile (Buiatti, 2014). Poiché l'energia e la materia sono così preziosi, la natura cerca un equilibrio tra risorse assunte e spese. Investire su una crescita eccessiva, per esempio, può sfociare nell'insufficienza di riserve energetiche oppure nella mancanza di un sostentamento adeguato al fine della sopravvivenza dell'organismo vivente. In tal caso anche la sopravvivenza, e quindi la trasmissione dei geni attraverso la riproduzione, vengono compromessi. La capacità delle ossa di ridistribuire il calcio a seconda delle zone maggiormente soggette a sollecitazioni è un esempio di questo principio. Infatti se le ossa presentassero una struttura compatta, guadagnerebbero di resistenza, compromettendo tuttavia la leggerezza. Di conseguenza anche il dispendio energetico di un corpo che trasporta un peso eccessivo sarebbe elevato. Pertanto, se il corpo percepisce che l'osso non ha bisogno di maggiore resistenza in alcune zone, elimina il calcio non necessario. (Biomimicry Institute, *Nature's Unifying Patterns*, 2022).

L'energia è una risorsa indispensabile, ma limitata, e per tale ragione deve essere usata con parsimonia. In natura le due principali spese energetiche sono proprio in virtù del reperimento di energia, come la fotosintesi, la ricerca e la cattura del cibo, e la crescita e la raccolta dei materiali che costituiscono l'organismo stesso o la loro dimora. Nonostante nessuna energia sia del tutto gratuita, dal momento che tutte in tutte le sue forme richiede un

dispendio per essere ottenuta, le fonti energetiche della Natura sono liberamente disponibili in quanto rinnovabili, locali e non devono essere estratte. Ne sono un esempio i raggi solari, il vento, i minerali disciolti dalle bocche profonde del mare, i materiali organici in decomposizione e i nutrienti di piante e animali di cui gli organismi si nutrono. Il condor, con un peso intorno ai 15 chili e un'apertura alare di 3 m necessita di una notevole quantità di energia per alzarsi in cielo e volare; tuttavia, sfruttando le correnti d'aria, è capace di alzarsi in volo riducendo al minimo il dispendio energetico (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

“Nulla si crea, nulla si distrugge, tutto si trasforma”. La legge di Lavoisier introduce un'ulteriore lezione da tenere a mente: in natura nulla viene sprecato. A differenza dell'approccio lineare, caratteristico dell'economia odierna, per cui alla fine della sua vita uno scarto è un problema, la Natura adotta una visione circolare secondo cui ogni tipologia di scarto è una risorsa preziosa. Il riciclo non è diretto; il legno non torna direttamente legno, ma viene scomposto da una serie di microrganismi nei vari componenti chimici di cui è costituito, che a loro volta vengono usati come materia utile da altri organismi. Ad esempio alcuni funghi sono in grado di decomporre la lignina, sostanza difficilmente gestibile da altri organismi; altri trasformano carboidrati e proteine del tronco e dei rami in energia e sottoprodotti. Durante il processo di decomposizione,

invece, un tronco può svolgere altre funzioni, come da riparo o ripostiglio per il cibo (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

A tal proposito è necessario anche sottolineare che in natura i materiali vengono ottenuti attraverso reazioni chimiche non tossiche. Questo perché il processo si compie all'interno e vicino alle cellule dell'organismo ed esso non deve essere danneggiato. La decomposizione e la crescita di sostanze avvengono senza arrecare alcun danno all'ambiente, utilizzando solo 28 dei 118 elementi presenti nella tavola periodica. A partire da poche sostanze di base la Natura è capace di dare vita a strutture complesse, spesso modulari, dotate al contempo di resistenza e leggerezza e, in alcuni casi, di elasticità. Inoltre, dei 28 elementi, 11 sono presenti in tutti gli organismi, tra i quali sono compresi quattro degli elementi più abbondanti sulla Terra – carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno. Altri cinque elementi, compresi alcuni metalli, si ritrovano in tutti gli organismi, ma in piccole quantità, e 12 sono più sporadici. Basti pensare al DNA, costituito solo da pochi elementi: carbonio, idrogeno, azoto, ossigeno e fosforo che, uniti, compongono il patrimonio genetico di tutti gli organismi viventi sulla Terra, conferendogli inoltre anche l'unicità (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

Consapevole di come i 28 elementi di cui si parlava prima sono distribuiti sul Pianeta, la Natura usa prevalentemente



06. Pigne del Pinus contorta, da flickr.com

materiali presenti in abbondanza e locali, sia per la costruzione di strutture esterne all'organismo, ad esempio nidi e tane, sia per la formazione di parti del corpo, come un'ala, un guscio, un corno. Materiali più rari vengono talvolta usati, ma nel caso sono locali e facilmente reperibili, senza lunghe e impattanti estrazioni, né trasporti (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022). A seconda delle risorse e delle caratteristiche del territorio, gli organismi e gli ecosistemi presenti in un luogo si sono evoluti in risposta alle condizioni ambientali locali. Alcune di queste condizioni mutano ciclicamente, come le maree, l'alternarsi delle stagioni e le inondazioni, altre sono caratteristiche intrinseche del territorio, come un'area più umida o più ventosa. Questi tratti nel corso delle generazioni hanno determinato il processo di adattamento degli organismi al dato ambiente, collocando questi ultimi all'interno di una specifica nicchia. Talvolta però le condizioni cambiano a causa dei cambiamenti climatici o dell'influenza degli organismi e degli ecosistemi sulle condizioni locali. Tale capacità di rispondere attivamente ai cambiamenti, sfruttandoli come opportunità, è definita resilienza e consente agli ecosistemi e agli organismi di prosperare. La diversità, la ridondanza, il decentramento,

l'auto-rinnovamento e l'auto-riparazione sono alcune delle caratteristiche che consentono agli organismi di essere resilienti (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

Per diversità si intende la capacità, da parte di un organismo, di svolgere una stessa funzione in modi differenti. Ad esempio il *Pinus contorta*, specie arborea appartenente alla famiglia delle Pinaceae diffusa nell'America nord-occidentale, è stata capace di sopravvivere all'incendio avvenuto nel 1988 nel Parco Nazionale di Yellowstone grazie alla sua produzione di due coni: una tipologia si apre per rilasciare i semi in condizioni canoniche, l'altra produce semi sigillati da resina che, in caso di alte temperature, si scioglie liberando i semi. In questo caso, dunque, la stessa funzione, la semina, viene svolta in due modi differenti, a seconda della necessità.

Con il termine diversità si intende anche la capacità di specie diverse di svolgere la medesima funzione, cosicché se una scarseggia, l'altra può sopperire al bisogno richiesto. Studiando l'ecosistema delle praterie emerge come numerose specie vegetali svolgano funzioni quali la fissazione dell'azoto, la ritenzione idrica e la stabilizzazione

del suolo; tuttavia la resilienza è incrementata dalla distribuzione in tutta l'area di rappresentanti di specie diverse che svolgono la medesima funzione. Questa soluzione ha due principali motivazioni: da un lato contiene la diffusione dei parassiti, in quanto molti di essi attaccano specie ben definite e quindi in un ecosistema diversificato difficilmente si diffondono; dall'altro favorisce il mantenimento di un valore costante di prestazioni nel caso di condizioni climatiche diversificate. Ad esempio se alcune piante sono più resistenti alla siccità, queste compensano la scarsità di specie che svolgono la medesima funzione ma che sono più propense a prosperare in un clima umido e viceversa. Questo garantisce la sopravvivenza a lungo termine dell'ecosistema (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022). Per questa ragione affidare a poche piante il compito di sfamare l'intero pianeta è una scelta tutt'altro che saggia. Infatti dipendere da poche specie vegetali, il grano, il mais, il riso, aumenta il rischio che una qualsiasi variabile imprevista possa rappresentare una catastrofe per l'umanità. Basti pensare che nel passato l'uomo attingeva a un numero di specie molto più ampio per il suo sostentamento. Nel XVII secolo, nonostante tutte le piante esotiche e di provenienza coloniale non fossero ancora in uso, in Europa il numero di specie vegetali comunemente consumate era il triplo di oggi (Mancuso, 2017).

Per ridondanza si intende che esiste più di un sistema,

organismo o specie rappresentativo che fornisce ogni funzione e che si verifica una sovrapposizione affinché la perdita o il declino di un rappresentante non comprometta l'intero sistema. Per esempio in una foresta sono presenti più esemplari di una specie, ciascuno dei quali produce più di un frutto affinché, nel caso in cui un esemplare o parte dei frutti siano gravemente danneggiati, la specie sopravviva.

“Decentramento” significa che i meccanismi che mantengono queste funzioni sono sparsi in tutto il sistema, non localizzati, in modo che un disturbo puntuale non elimini una o più parti vitali dell'intero sistema (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022). L'apparato vegetale ne è un ottimo esempio. L'uomo è formato da vari organi, ciascuno dei quali svolge una determinata funzione. Nel caso di danneggiamento, l'intero sistema è compromesso, portando, nel peggiore dei casi, alla morte dell'individuo. Le piante invece sono composte da unità replicate che, insieme, ne costituiscono l'architettura generale e ne definiscono la fisiologia. Qualsiasi funzione che negli animali è affidata a organi specializzati, nelle piante è diffusa sull'intero corpo. La loro costruzione modulare è la rappresentazione di come solidità e flessibilità possano coniugarsi. Infatti la pianta è costituita da un'architettura cooperativa, distribuita e senza centri di comando, capace di resistere perfettamente a eventi catastrofici senza perdere funzionalità. Si tratta di una strategia evolutiva: se gli animali ritengono che



07. Mutualismo tra anemone e pesce pagliaccio, da ansa.it

l'ambiente in cui vivono non sia più idoneo, si spostano, se sono predati, scappano; la pianta invece non può fuggire di fronte alle difficoltà, alle intemperie, agli erbivori che di lei si nutrono perché non è mobile e per questo ha dovuto rendersi indistruttibile (Mancuso, 2017).

“Auto-rinnovamento” e “auto-riparazione” sono termini che si applicano più spesso a livello cellulare o organismico, ma l'auto-rinnovamento può essere applicato anche in contesti ecologici. In ambito microscopico i termini significano che gli organismi hanno la capacità di generare nuove cellule, di guarire le ferite e gli organi danneggiati, di rispondere alle minacce batteriche e virali e altro ancora (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

La sopravvivenza in natura è possibile anche attraverso la collaborazione. Tra specie diverse esistono due processi cooperativi, ovvero il mutualismo e il commensalismo. Il primo, anche chiamato simbiosi mutualistica, “è un'associazione di specie differenti che comporta un vantaggio reciproco, ma non obbligato.” (Treccani E. , Mutualismo, s.d.) Le due specie, infatti, sono possono vivere indipendentemente l'una dall'altra. Il commensalismo, invece, è una “relazione tra due specie

da cui una delle due trae un vantaggio, sfruttando le risorse trofiche dell'altra, senza che quest'ultima ne riceva vantaggio o danno.” (Treccani E. , Commensalismo, s.d.) Riguardo al beneficio, invece, questo può essere un semplice sottoprodotto di comportamenti specifici, come l'uso di un rifiuto di un organismo come risorsa per un altro, oppure il frutto di relazioni ancestrali, come protezione e riparo. La cooperazione tra anemone di mare e pesce pagliaccio ne è un esempio. Infatti i tentacoli dei primi contengono capsule urticanti simili ad arpioni, chiamati nematocisti, con cui tramortiscono le prede e allontanano i predatori; tuttavia i pesci pagliaccio secernono un muco che li rende immuni ai nematocisti e che gli permette di trovare rifugio nell'anemone. In cambio il pesce fornisce nutrimento attraverso i suoi rifiuti e lo protegge dai pesci farfalla, in grado di predare l'anemone (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

Oltre a una cooperazione fisica, bisogna anche considerare il beneficio che deriva dalla condivisione delle informazioni. All'interno di un ecosistema i vari attori comunicano usando linguaggi molto diversi tra loro al fine di fornire informazioni che ne garantiscano la

sopravvivenza. I linguaggi possono variare dal sonoro, al visivo, all'olfattivo e non solo. C'è ancora molto da scoprire a riguardo. Ad esempio nelle pianure africane alcune piante di acacia hanno evoluto una strategia di rilevamento sensoriale per rispondere alla minaccia di erbivori. Quando un animale inizia a cibarsi delle foglie di una pianta, questa secerne un gas etilene che da un lato funge da allarme per le altre piante, che a loro volta iniziano a produrlo, diffondendo l'informazione, dall'altra segnala la necessità di rilasciare una tossina, come il cianuro di idrogeno, nelle foglie. In questo modo il predatore viene scoraggiato e si allontana (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

L'ultima lezione che attualmente si può trarre dalla natura è probabilmente la più familiare ai progettisti, ma al contempo, forse, la più dimenticata. In natura la forma segue la funzione (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022). Ogni dettaglio, ogni forma, anche quella che sembra essere una caratteristica puramente estetica

in realtà ha uno scopo puntuale. Può essere un retaggio evolutivo che oggi non è più così fondamentale, ma non è mai frutto del caso. Attualmente sul pianeta Terra si conoscono quasi 1,5 milioni di specie. 1,5 milioni di risorse da cui l'uomo può trarre ispirazione, senza considerare due importanti osservazioni: la prima è che da ciascuna specie si può estrapolare più di una soluzione biomimetica. La seconda è che si ipotizza che ne esistano altre 7 milioni ancora da scoprire (Biomimicry Institute, Nature's Unifying Patterns, 2022).

## 1.4 Metodologie

Generalmente le ricerche progettuali su base biomimetica possono avvenire seguendo due metodologie principali. In entrambe la fase di astrazione del modello biologico è cruciale poiché funge da punto di partenza per il dialogo interdisciplinare e perché corrisponde alle fondamenta del processo di interpretazione ed emulazione dell'espedito naturale (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009).

### 1.4.1 Bottom up

La prima metodologia è definita bottom-up, o biology to challenge perché, partendo da una ricerca biologica basilare, si esplorano tutti i meccanismi e le soluzioni messe in atto da una specie per muoversi e sopravvivere all'interno della sua nicchia per poi metterle a disposizione di intuizioni e ulteriori sviluppi da parte dei progettisti. In altri casi, invece, l'osservazione è relativa a un solo comportamento dell'organismo. Una volta individuata l'ispirazione biologica, esperti in vari ambiti mettono a punto le implementazioni tecnologiche nate da queste

intuizioni. Bisogna considerare che, qualora il principio venga compreso e l'astrazione sia effettuata efficacemente, il processo bottom-up può dare origine a un numero di implementazioni decisamente maggiore, data la varietà di ambiti di applicazione e declinazione di ciascuna tecnologia. Il limite di questa metodologia risiede nelle tempistiche dilatate. Infatti, generalmente trascorrono dai tre ai sette anni fra il riconoscimento di una funzione biologica o una struttura interessante per l'implementazione tecnica e la realizzazione di un dispositivo biomimetico a essa correlato (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). L'invenzione del Velcro è un esempio di metodologia bottom-up, nata dall'intuizione dell'ingegnere svizzero George de Mestral. Egli infatti, tornando da un'escursione con il suo cane, a cui si erano attaccati semi di bardana, osservandone la forma, comprese che potevano essere usati come modello per una nuova tipologia di chiusura a gancio e anello (Biomimicry Institute, 2022).



08. Bardana (*Arctium lappa*) ed estremità a unicino, da wired.it

## 1.4.2 Top down

La seconda metodologia è chiamata *top-down*, o challenge to biology. Il processo è invertito rispetto all'approccio bottom-up, poiché prima vengono definiti l'ambito di applicazione e la problematica, poi si ricerca nella Natura la soluzione biologica a cui ispirarsi per la risoluzione della sfida. Le tempistiche sono accelerate rispetto al processo bottom-up, aggirandosi fra i sei e i diciotto mesi dalla delineazione del problema alla produzione di un prototipo. Il limite risiede nell'esiguità dell'incremento innovativo apportato solitamente dal progetto (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). La singolare forma dei treni Shinkansen è un celebre esempio di questa metodologia. Infatti in principio, quando questi treni, che viaggiano a circa 350 km/h non avevano ancora assunto queste sembianze, nel momento in cui entravano in una galleria, l'improvvisa variazione della resistenza dell'aria generava onde di pressione atmosferica che gradualmente si trasformano in onde come quelle di marea. Una volta raggiunta l'uscita del tunnel,



09. Martin pescatore in procinto di tuffarsi in acqua, da rickytrevisani.wordpress.com

avevano origine onde a bassa frequenza che producevano vibrazioni aerodinamiche così intense che residenti a 400 metri di distanza registravano lamenti. Partendo da questo problema, gli ingegneri si sono chiesti quale essere vivente fosse in grado di gestire quotidianamente cambiamenti improvvisi della resistenza dell'aria. La risposta è ricaduta sul martin pescatore che, per catturare la sua preda, si tuffa dall'aria (bassa resistenza), all'acqua (alta resistenza). Il tutto senza produrre schizzi. La ragione di questa capacità è data dalla forma del becco, che è stata riprodotta in macroscale sui treni, riducendo la pressione dell'aria del 30%, il consumo di elettricità del 15% e incrementando la velocità del 10%. (Kobayashi, 2005)

Seguendo questo ordine è stato elaborato dalle fondatrici del Biomimicry Institute, Janine Benyus e Dayna Baumeister, con il supporto grafico di Carl Hastrich, un metodo progettuale sistemico chiamato Spirale del Design, che viene approfondito nel paragrafo successivo.

## 1.5 Linee guida per una progettazione biomimetica - La Spirale del design

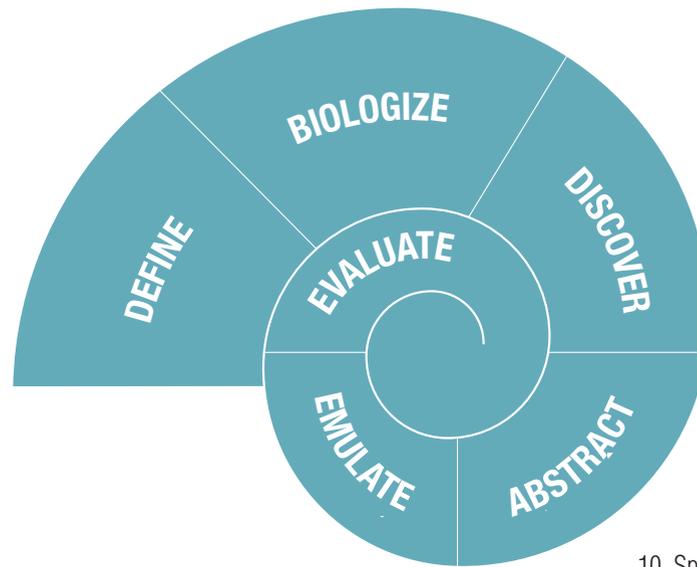
Quando si inizia una sfida di progettazione è importante cercare di liberarsi degli *habitus*, mettendo in discussione anche ciò che è a tal punto radicato nella nostra cultura da essere giudicato immutabile. Il primo passo che occorre fare è partire dalla problematica che si vuole risolvere per poi cercare le soluzioni che la Natura ha elaborato per risolvere quel determinato problema. È indispensabile attuare un processo di astrazione del quesito, in modo tale da non essere influenzati dalle soluzioni già presenti sul mercato, che non sempre sono sostenibili. Per esempio, si vuole progettare un casco per la bicicletta, oppure si vuole progettare un modo per proteggere la testa di un ciclista da un eventuale impatto? Formulare un obiettivo in questo modo apre la mente a nuovi approcci alla sfida che poi può sfociare in un progetto che potrebbe non assomigliare affatto a un casco attuale.

Seguire un processo di progettazione può essere estremamente utile quando ci si accinge a risolvere una sfida progettuale. La Spirale di progettazione biomimetica scandisce le tappe fondamentali per una progettazione

che utilizza la natura come guida per la creazione di soluzioni. Descrive le sei fasi più importanti che un gruppo di progettazione dovrebbe seguire quando cerca soluzioni biomimetiche a una sfida progettuale. Nonostante siano disposte in ordine cronologico, spesso risulta necessario ritornare su una o più fasi più volte durante il processo, a seconda della necessità e delle nuove informazioni che emergono in corso d'opera. Di seguito sono riportate le sei fasi.

### Define

Nella prima fase bisogna decidere la problematica e il contesto da risolvere. È necessario articolare in modo chiaro l'impatto esercitato dal progetto, avendo ben definiti i criteri e i vincoli che ne determinano il successo. L'obiettivo non è decidere cosa produrre o progettare, ma comprendere cosa deve fare il progetto, per chi e in quale contesto si colloca. Più la questione è complessa, maggiore deve essere la cura nell'accertarsi di possedere



10. Spirale del Design, da biomimicry.org

tutte le conoscenze necessarie a riguardo. È importante definire i vincoli e le specificità, considerare le necessità degli stakeholder, il luogo e l'ambiente in cui il progetto è inserito. Per fare questo bisogna esplorare anche il sistema in cui il problema è inserito, le interazioni, le relazioni, i confini e le connessioni con gli altri sistemi affinché questo possa essere trasformato in opportunità.

## Biologize

Una volta definita la sfida si inizia a rivolgere lo sguardo alla Natura per trovare strategie per la risoluzione di problemi di progettazione. Questa è la fase in cui la sfida viene riformulata in un contesto biologico. Alla fine del processo bisogna aver formulato una o più domande in termini biologici, trasferendo la sfida umana in quella affrontata dal mondo naturale. Man mano che si procede in questa fase si può scoprire che ci sono più funzioni in gioco o che esistono più modi per definire biologicamente la funzione e il contesto della sfida.

## Discover

Questa fase consiste nel cercare una risposta alle domande poste precedentemente. Bisogna esplorare libri e risorse online, nonché trascorrere molto tempo in mezzo alla natura, osservandone i fenomeni e prendendo nota di essi. Il lavoro da svolgere è molto simile a quello di un naturalista: osservare, prendere nota, fare schizzi, riportare quanto emerge. Bisogna condurre le ricerche guidati dal contesto il più simile possibile a quello in cui il progetto si colloca, cercando nei modelli naturali, che possono includere ecosistemi e organismi. È necessario cercare tra più specie, ecosistemi e scale e imparare tutto il possibile sui vari modi in cui la natura si è adattata alle funzioni e ai contesti rilevanti per la sfida in questione.

## Abstract

Una volta individuate le specie o gli ecosistemi che rispondono ai requisiti necessari, è il momento di

sviscerarne il funzionamento, studiando i meccanismi che rendono vincenti le strategie biologiche attraverso la consultazione di riviste ed esperti del settore. Bisogna elaborare una strategia di progettazione che faciliti la traduzione degli insegnamenti della biologia in soluzioni. Le strategie devono descrivere il funzionamento della strategia biologica senza ricorrere a termini del settore. Questo facilita la collaborazione interdisciplinare perché una lo sviluppo della soluzione deve concentrarsi sulla funzione e sul meccanismo senza il bagaglio di termini biologici potenzialmente sconosciuti. L'Abstract è la fase più problematica della progettazione e può rivelarsi necessario consultare un biologo, un ingegnere o un chimico per accertarsi di aver compreso appieno il meccanismo.

## Emulate

La fase di emulazione è il cuore della biomimetica. A questo punto bisogna unire i puntini, trovare gli elementi comuni alle soluzioni trovate, unendo meccanismi anche diversi per arrivare al risultato finale. Più che una imitazione delle strategie della natura, l'emulazione è un processo esplorativo che richiede un'essenzializzazione e rielaborazione del modello per poi trasporlo in un progetto. In questa parte del processo è necessario riconciliare ciò che si è appreso nelle ultime quattro fasi della Spirale del Design in un concetto di design coerente e adatto alla vita. In questa fase è importante mantenere una mentalità aperta

e abbandonare qualsiasi idea preconcepita su quale potrebbe essere la soluzione finale. È utile usare tecniche come il brainstorming e le mappe mentali.

## Evaluate

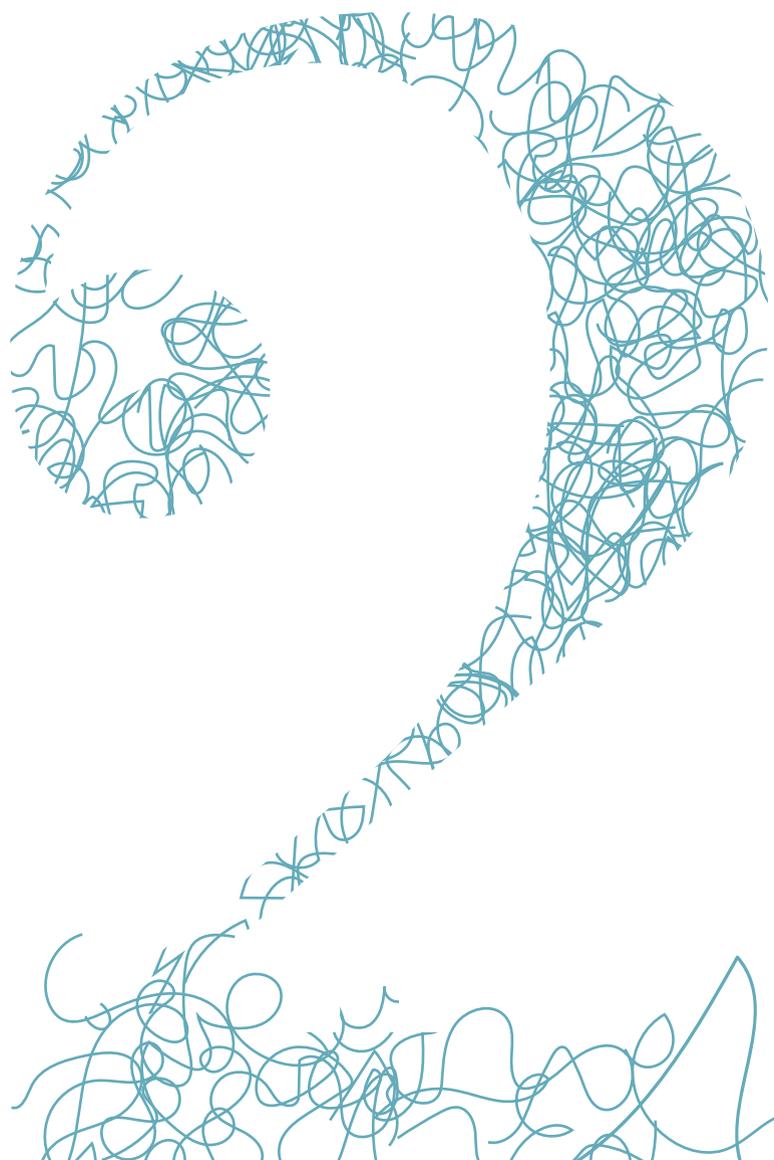
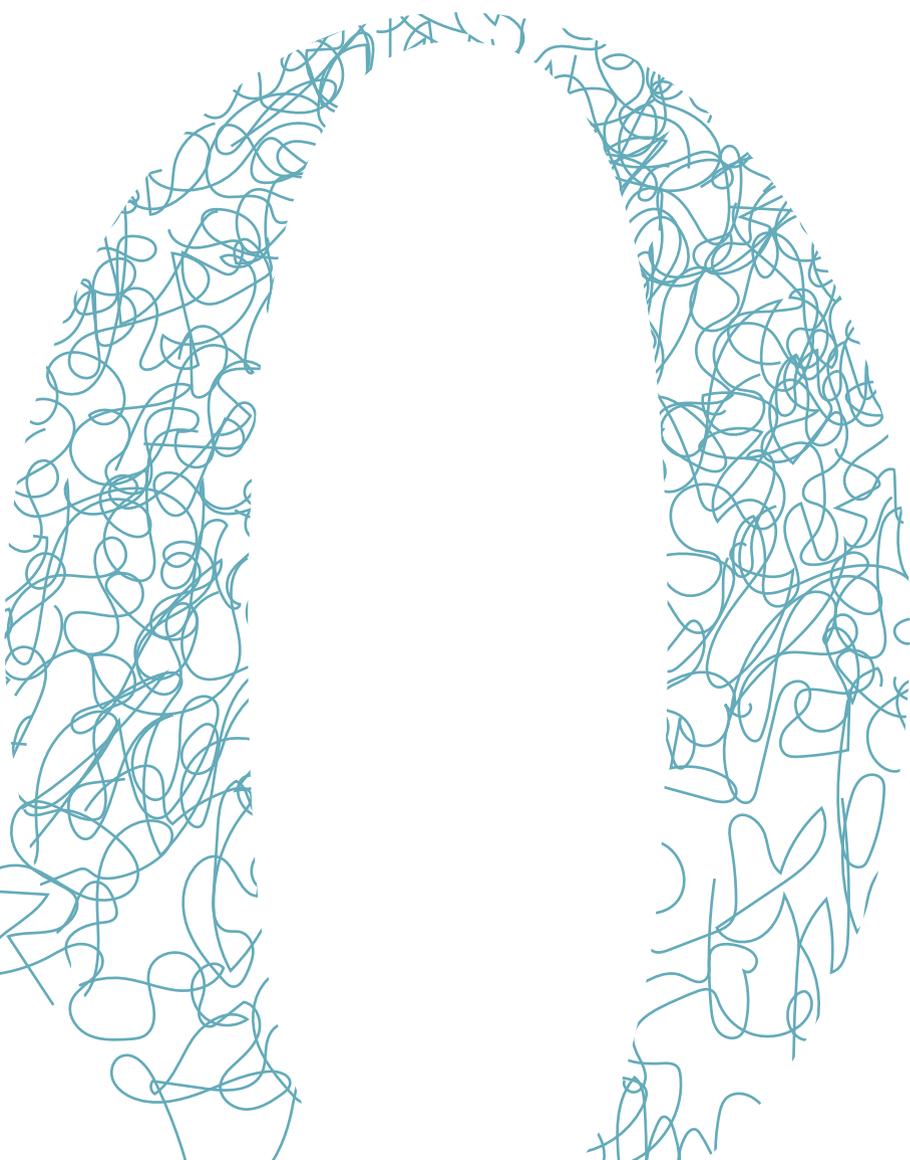
Una volta elaborata una soluzione è necessario che questa venga testata in modo tale da verificarne il funzionamento e l'efficacia. I concept di progetto vengono valutati in base alla loro capacità di soddisfare il bisogno e considerando i limiti e punti di forza. È necessario anche considerare la fattibilità del progetto in termini economici e tecnici. Se il progetto lo richiede, è necessario anche fare modifiche al progetto, ritornando su una o più fasi. Sebbene la fase Evaluate sia indicata come l'ultima della Spirale progettuale, la valutazione dovrebbe avvenire più volte nel corso del processo di progettazione e con rigore crescente. All'inizio del processo, può trattarsi di una semplice riflessione conseguente alla generazione di una serie di idee per identificare quali concetti hanno il maggior potenziale e quali invece sembrano essere un vicolo cieco. Quando si arriva alla definizione di un concept, la valutazione può comportare attività più complesse, come la creazione di modelli, la sperimentazione di tecnologie o la condivisione di prototipi con gli utenti o gli stakeholder per sollecitare un feedback (Benyus, 2015-2022).

## 1.6 I limiti della biomimesi

Dal momento che la Natura per definizione opera in regime di sostenibilità, è pensiero comune che, se si progetta con un approccio biomimetico, il prodotto sia automaticamente ecosostenibile. La realtà però non sempre rispecchia l'aspettativa. Così come le stampanti 3D hanno permesso la realizzazione di prodotti altrimenti irrealizzabili, allo stesso modo, le tecnologie e i materiali attualmente a disposizione talvolta potrebbero non implicare un miglioramento in termini di sostenibilità rispetto ai competitor canonici. Imitare la Natura spesso può portare a risultati inefficienti per le applicazioni dell'uomo, in quanto è inevitabile attuare salti di scala e cambiamenti dei materiali per gli usi industriali (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). Basti pensare ai tempi che talvolta la Natura richiede, oppure l'attuale impossibilità di riprodurre esattamente un materiale che appartiene a una specie. In alcuni casi, per riprodurre fenomeni naturali con le tecnologie a disposizione, è necessario impiegare materiali ad alto impatto ambientale, come elementi rari, o che richiedono processi di estrazione che deturpano il territorio e la flora e fauna locali. È altresì

vero che nessun prodotto è completamente sostenibile. Durante il suo ciclo di vita ci sono inevitabilmente fasi a maggiore impatto sull'ambiente. È necessario dunque fare un bilancio sui costi e benefici, come l'aumento della produttività, il risparmio energetico, il fine per cui il prodotto viene progettato, la durata della vita, cosa quel progetto dovrebbe sostituire e i benefici che apporta rispetto ai prodotti analoghi presenti sul mercato.

La non ancora validata connessione tra ecosostenibilità e approccio biomimetico è stata ricordata anche dal Professore e Dottore Thomas Speck durante la conferenza *Design and Nature*, tenutasi in Portogallo nel 2008. Restano però fondate le basi di una sostenibilità intrinseca a seguito di un progressivo affinamento dell'approccio biomimetico, dei suoi strumenti e delle sue realizzazioni (Salvia, Rognoli, & Levi, 2009). Nulla esclude che, se al momento la biomimesi si è occupata di migliorare la funzionalità dei materiali e delle strutture, in futuro possa intraprendere la strada verso materiali di sintesi più puliti e verdi (Bonser, 2005).



# LA BIOMIMESI NEL DESIGN D'INTERNI





## 2.1 Metodologia di ricerca

La ricerca di casi studio di prodotti d'arredamento che fossero stati concepiti con un approccio biomimetico non ha dato frutti nell'immediato.

In un primo momento sono stati consultati i siti istituzionali in ambito biomimetico, come [biomimicry.org](http://biomimicry.org) e [AskNature](http://AskNature), che tuttavia non riportavano esempi inerenti al tema del design d'interni, nonostante fossero presenti progetti di altra tipologia, soprattutto chimica e ingegneristica.

A seguito di una ricerca più generica su Google due progetti sono stati classificati come idonei. Il primo è la *Biomimicry 3D Printed Soft Chair*, un progetto di laurea della designer danese Lilian van Daal; il secondo è la *Coral Seating* dello Studio Aisslinger.

A questo punto la ricerca ha vissuto un momento critico in quanto un approccio diretto non dava ulteriori risultati.

L'inversione dell'approccio metodologico, passando da una ricerca di prodotti già classificati come biomimetici, a una consultazione di cataloghi di brand di design d'interni, ha rappresentato un punto di svolta.

Grazie al suggerimento del designer Ross Lovegrove da

parte della docente relatrice due progetti sono stati aggiunti alla ricerca: il packaging per il profumo Formula 1 e la serie di sedute *Supernatural*, realizzate per Moroso. Il catalogo di quest'ultimo brand è stato consultato, ma a parte il precedente caso studio, non sono stati individuati altri prodotti che soddisfacessero i requisiti. Anche i cataloghi di Kartell, Zanotta, Cassina, Artemide, C&B sono stati esplorati, ma senza ulteriori risultati.

A seguito di una ricerca di volumi potenzialmente interessanti tra quelli disponibili nella biblioteca del Politecnico al Castello del Valentino, sono stati consultati due libri: il catalogo della mostra intitolata *Nature design from inspiration to innovation*, tenutasi a Zurigo presso il Museo del design (*Museum für gestaltung Zürich*, 2007), e *The nature and Aesthetics of Design* di David Pye, che tuttavia non ha riportato alcun risultato. Nel primo volume, invece, è stato individuato un altro designer, Joris Laarman, che nel 2006 progettò la prima versione della *Bone chair* per poi elaborare una serie di sedute basate sul medesimo principio della prima.

Le sedute Bow and Rise dello studio Zaha Hadid sono state individuate invece consultando la pagina web di diversi celebri architetti e designer, fino a giungere a quello dell'architetta. Dal momento che la seduta fu prodotta per l'azienda Nagami, anche la pagina web del brand è stata consultata per eventuali altri progetti interessanti. Uno studio più approfondito della designer van Daal ha condotto alla scoperta di altri due casi studio inerenti, progettati dalla medesima: Radolaria #1 e Sellino

bioispirato. Infine sulla pagina Instagram @Biomimicry.design.alliance è stato pubblicato il lavoro di Michael Pawlyn.

È stato inoltre suggerito dalla docente relatrice, la Professoressa Barbero, il lavoro condotto dall'Hybrid Design lab, fondato dalla Professoressa Carla Langella, che insegna presso l'Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli.

## 2.2 Casi studio



11. Biomimicry 3D Printed soft chair, da [lilianvandaal.com](http://lilianvandaal.com)

Lo schema secondo cui i seguenti casi studio sono stati studiati prevede un'analisi del contesto in cui sono stati sviluppati, quindi il luogo di produzione, l'anno, il nome del progettista, e aspetti più tecnici, quali il materiale selezionati, la fonte di ispirazione e la tipologia di ispirazione. A tal proposito, relativamente a questi casi studio, sono state individuate tre famiglie, che non di rado convivono nello stesso progetto: monomatericità, riduzione materica e struttura. Per monomatericità si intende la realizzazione del progetto in un unico materiale, per riduzione materica la tendenza a minimizzare l'uso di materiale, concentrandolo dove le sollecitazioni sono maggiori, a favore della leggerezza, e infine l'imitazione delle strutture naturali per vincere la gravità, ottimizzare lo spazio, oppure offrire un certo confort.

### Biomimicry 3D printed soft chair

Designer: Lilian van Daal

Luogo e anno: Olanda, 2014

Azienda produttrice: Prototipo

Materiali: Poliammide (PA) 3D Systems Benelux

Ispirazione: Cellule vegetali

Approccio alla biomimesi: strutturale, riduzione materica, monomatericità

Descrizione: Ispirandosi alla cellula vegetale, la designer danese ha sviluppato una sedia in stampa 3D. La densità del materiale varia a seconda della funzione: laddove è richiesta una maggiore resistenza strutturale il materiale è più rigido, dove invece la seduta deve avvolgere le forme corporee il materiale è più malleabile e avvolgente. Le cellule delle piante sono la fonte d'ispirazione della seduta, in quanto esse, a seconda della necessità, si adattano per svolgere differenti funzionalità, dalla resistenza strutturale alla flessibilità. Allo stesso modo la designer, usando un solo materiale, ottiene per la sua seduta diverse prestazioni grazie alla conformazione delle unità fondamentali (van Daal, 2017).



12. Coral Seating, da [aisslinger.de](http://aisslinger.de)

## Coral Seating

Designer: Studio Aisslinger

Luogo e anno: Germania, 2016

Azienda produttrice: Studio Aisslinger

Materiali: Feltro e policarbonato

Ispirazione: Coralli

Approccio alla biomimesi: strutturale, riduzione materica

Descrizione: Ispirata alla struttura geodetica dei coralli, la seduta Coral è costituita dalla ripetizione del modulo a celle esagonali che le permettono di raggiungere flessibilità e resistenza al contempo (Studio Aisslinger, 2022).

## 3D Printed Table

Designer: Michael Pawlyn

Luogo e anno: Germania, 2016

Azienda produttrice: Architecture Foundation

Materiali: Polipropilene PP

Ispirazione: Crescita rami degli alberi e delle ossa



13. 3D Printed Table, da [dezeen.com](http://dezeen.com)

Approccio alla biomimesi: strutturale, riduzione materica, monomatericità

Descrizione: In occasione della mostra Exploration Architecture l'architetto Michael Pawlyn ha realizzato in stampa 3D un tavolo ispirato alla struttura delle ossa e degli alberi. Il risultato è un prodotto che riduce a 1/1000 il materiale richiesto. (Lindsay, 2020)

## Formula 1

Designer: Ross Lovegrove

Luogo e anno: Emirati Arabi Uniti, 2019

Azienda produttrice: Formula 1 - Eithad Airways Abu Dhabi Grand Prix

Materiali: Resina tecnopolimerica

Ispirazione: Rami degli alberi Approccio alla biomimesi: strutturale, riduzione materica, monomatericità

Descrizione: In occasione dell'Eithad Airways Abu Dhabi Grand Prix è stata commissionata a Ross Lovegrove la realizzazione del packaging della serie di profumi Formula



14. Fragranza Formula 1, da dlmag.com



15. Serie Supernatural chair, da moroso.it

1. Il risultato è un esoscheletro in stampa 3D dalle forme organiche che combina resistenza strutturale a leggerezza. Il flacone viene sostituito, l'esoscheletro riutilizzato. (F1 Fragrances, 2022)

## Supernatural chair

Designer: Ross Lovegrove

Luogo e anno: Italia, 2005-2008

Azienda produttrice: Moroso

Materiali: Polipropilene rinforzato. Cuscinetti termoformati con espanso e tessuto ignifugo.

Ispirazione: Ossa

Approccio alla biomimesi: riduzione materica, monomatericità

Descrizione: La serie di sedute Supernatural, progettate da Ross Lovegrove traggono ispirazione dalla struttura ossea per dar vita a oggetti leggeri fisicamente e visivamente. Le due soluzioni consentono una maggiore traspirazione della schiena, donando un maggior confort. (Moroso, 2022)

## Bow and rise

Designer: Patrik Schumacher e Sebastian Andia per Zaha Hadid

Luogo e anno: Spagna, 2018

Azienda produttrice: Nagami

Materiali: Polilattice PLA

Ispirazione: Coralli

Approccio alla biomimesi: strutturale, monomatericità

Descrizione: Le sedute Bow and Rise combinano i processi di ottimizzazione strutturale che si trovano tipicamente in natura a tecnologie e materiali innovativi per dare vita a prodotti dai colori brillanti e dalle forme organiche che sfidano la gravità. La struttura è ispirata ai coralli. (Nagami, 2022)

## Bone chair

Designer: Joris Laarman

Luogo e anno: Olanda, 2006



16. Sedute Bow and Rise, da nagami.design



17. Bone chair, da jorislaarman.com

Azienda produttrice: Collezioni museali

Materiali: Alluminio

Ispirazione: Ossa

Approccio alla biomimesi: strutturale, riduzione materica, monomatericità

Descrizione: Utilizzando il software sviluppato dall'Adam Opel GmbH, Joris Laarman ha progettato una seduta in alluminio ispirata alle ossa. La loro capacità di modificare la struttura interna a seconda delle sollecitazioni che ricevono dal mondo esterno al fine di raggiungere un rapporto ottimale resistenza-peso, è infatti la genesi del progetto.

La seduta in alluminio è realizzata in un unico pezzo con una colata in stampo in ceramica stampato in 3D. Diversamente le saldature sarebbero state visibili. A seguito di questo primo esperimento è nata una collezione di sedute, da una chaise longue a una sedia a dondolo, che seguono il medesimo principio. (Laarman, 2022)

## Radolaria #1

Designer: Lilian van Daal

Luogo e anno: Olanda, 2018

Azienda produttrice: Oceanz 3D

Materiali: Poliammide riciclata PA12

Ispirazione: Radiolaria e Bryozoa

Approccio alla biomimesi: strutturale, monomatericità

Descrizione: I microorganismi Radiolaria e Bryozoa costituiscono la fonte di ispirazione per questa seduta, realizzata interamente in stampa 3D utilizzando un solo materiale, che assolve tutti i requisiti. Rispetto al primo esperimento biomimetico della designer, la Biomimicry Soft Chair, il nuovo progetto riduce del 50% tempi di produzione e consumi. I radiolari sono organismi unicellulari che si trovano come zooplancton in tutto l'oceano e prendono il nome dalla simmetria radiale delle loro spine scheletriche. La struttura di Radiolaria amplificata dalla stampa 3D offre vari livelli di flessibilità e comfort senza utilizzare diversi tipi di schiuma come nelle



18. Radolaria #1, da lilianvandaal.com



19. Sellino bioispirato, lilianvandaal.com

sedute morbide comuni. I Bryozoa sono animali muschio che vivono in acque tropicali e ambienti di acqua dolce. Il reticolo di connessioni all'interno degli scheletri di Bryozoa ha ispirato Van Daal a creare un sistema di punti di connessione per il montaggio della sedia senza necessità di collanti. (van Daal, 2017)

## Sellino bioispirato

Designer: Lilian van Daal

Luogo e anno: Olanda, 2019

Azienda produttrice: StudioMOM

Materiali: Poliammide riciclata PA12

Ispirazione: Foglie, ragnatele

Approccio alla biomimesi: strutturale, riduzione materica, monomaterialità

Descrizione: Questo sellino realizzato in stampa 3D imita i modelli naturali su ampia scala, da una foglia a una ragnatela, per ottenere leggerezza e resistenza. Il sellino è realizzato su misura a seconda delle esigenze. (van Daal,

2017)

## Nebula

Designer: Raffaella Bizarro con supporto scientifico di Carla Langella, Francesca Castanò e Sergio Sibilio

Luogo e anno: Italia, 2019

Azienda produttrice: Hybrid Design lab

Materiali: ETE

Ispirazione: Bruchi delle tende

Approccio alla biomimesi: strutturale

Descrizione: Ispirandosi alla struttura stratificata delle tende di questi bruchi, la designer Raffaella Bizarro ha progettato una lampada caratterizzata da un gioco di diffusione della luce. Grazie alla diversa densità degli strati l'intensità luminosa varia. Il bruco delle tende infatti, sfrutta a seconda delle esigenze climatiche la differenza di strati di cui è fatto il suo bozzolo. Se necessita di maggiore calore, come avviene all'inizio della primavera, riposa in genere in un aggregato stretto appena sotto una superficie



20. Lampada Nebula, da [hybriddesignlab.org](http://hybriddesignlab.org)

illuminata dal sole della tenda; se invece ricerca frescura può ritirarsi sulla superficie esterna ombreggiata della tenda per raffreddarsi (Hybrid Design Lab, Nebula, 2021).

## Diafanea

Designer: Enza Migliore con supporto scientifico di Carla Langella, Francesca Castanò e Sergio Sibilio

Luogo e anno: Italia, 2019

Azienda produttrice: Hybrid Design lab

Materiali: Schiuma ibrida silicea

Ispirazione: Diatomea

Approccio alla biomimesi: strutturale

Descrizione: Le fonti luminose LED sono caratterizzate da ridotti consumi energetici ma presentano un rischio di abbagliamento e di influenza sui ritmi circadiani che richiedono soluzioni di design che filtrino la luce conferendole qualità estetiche e percettive differenziate in relazione ai settori e ai contesti di applicazione.

Il progetto Diafanea propone una deposizione all'interno



21. Diafanea, da [hybriddesignlab.org](http://hybriddesignlab.org)

di diffusori sferici in vetro di strati differenziati di schiuma ibrida silicea, con porosità organizzate gerarchicamente come quelle delle diatomee tali da consentire al designer di “progettare la qualità della luce” in funzione dell’effetto desiderato (Hybrid Design Lab, 2021).

## Phylum Ctenophora

Designer: Marco Fiume con supporto scientifico di Carla Langella e Valentina Perricone

Luogo e anno: Italia, 2020

Azienda produttrice: Hybrid Design lab

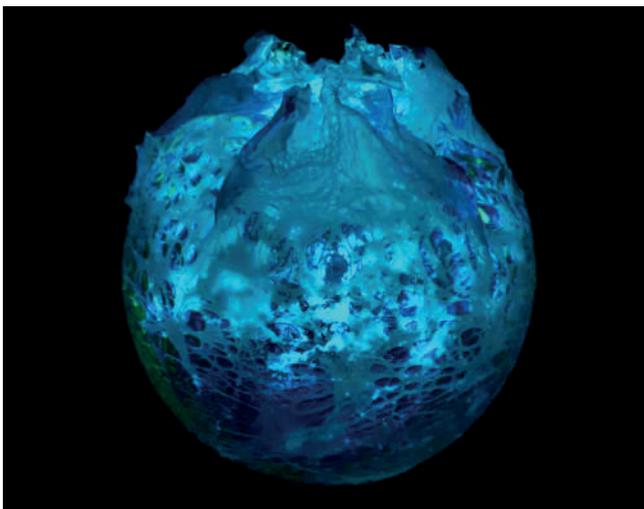
Materiali vetro con film plastico dicroico

Ispirazione: Ctenofori

Approccio alla biomimesi: strutturale

Descrizione: Le lampade sono realizzate attraverso un processo brevettato che prevede di modificare in modo puntuale la qualità cromatica della luce LED, avvalorando le proprietà fisiche della plastica.

Attraverso un innovativo processo di lavorazione, un



22. Phylum Ctenophora, da [hybriddesignlab.org](http://hybriddesignlab.org)

film plastico diecrico riciclabile derivante da scarti di lavorazioni industriali viene modificato su un diffusore in vetro soffiato, al fine di ottenere una serie di texture e porosità cangianti durante il giorno a seconda della luce e del punto di vista. Queste texture a loro volta, vengono enfatizzate da una trama fosforescente blu interna alla struttura vitrea che assorbe energia dalla luce naturale e artificiale restituendola al buio autonomamente quando le lampade sono spente, permettendo così di risparmiare energia. (Hybrid Design Lab, 2021)

## 2.3 Confronto dei risultati

Una volta condotte le ricerche riguardo allo stato dell'arte delle applicazioni dell'approccio biomimetico nell'ambito del design d'interni, i risultati ottenuti sono stati messi a confronto con l'obiettivo di fornire un panorama generale che offra il punto di partenza per lo sviluppo della fase progettuale della tesi. Dal punto di vista temporale i prodotti sono collocati in una fascia compresa tra il 2005 e il 2020, con un incremento nella progettazione a partire dal 2014. La recente nascita dell'approccio biomimetico per come è inteso oggi giustifica in qualche modo la mancanza di progetti antecedenti al nuovo millennio che rispondano ai requisiti. Infatti, durante la fase di ricerca è emerso che la maggioranza dei progetti ispirati alla Natura presenti sul mercato tendono decisamente al biomorfismo piuttosto che al biomimetismo. Si pensi ai tavoli progettati da Carlo Mollino, all'appendiabiti Cactus di Guido Drocco e Franco Mello, alla lampada Taraxacus di Achille Castiglioni. Certo è che l'ambito offre potenzialità ancora inesplorate. Lo rivelano l'esiguità dei progetti individuati come idonei, solo 12, e la loro funzione. Infatti, considerando sette

macroaree, tavoli, vasi, armadi, lampade, sedie e scaffali, sono stati individuati un tavolo, tre lampade, sette sedie e un vaso. Due di questi prodotti rientrano trasversalmente nella loro categoria. Uno è una boccetta per il profumo, che rientra nella categoria dei vasi, l'altro è un sellino per la bicicletta, considerata come una seduta. Le altre due categorie, scaffali e armadi, non presentano alcun caso studio. Considerando il periodo storico in cui i prodotti sono stati progettati, è interessante notare che ben il 50% dei casi studio sono realizzati attraverso tecnologie a stampa 3D, segno dell'importanza della progressione tecnologica nell'accompagnare e rendere possibile l'avanzamento progettuale. Molti dei casi studio, infatti, grazie alle stampanti 3D, sono prodotte monomateriali e con livelli di dettaglio diversamente impossibili; si pensi a Radolaria 1# e a Biomimicry 3D Printed Soft chair, le cui complessità strutturali non sarebbero state realizzabili usando tecnologie tradizionali. L'uso delle stampanti 3D consente anche una riduzione materica e soprattutto l'assenza di stampi, la cui produzione ha necessariamente

un impatto a livello di impiego di materiale e dispendio energetico. Si rileva anche una netta prevalenza nell'uso di materiali plastici (68%), seguito dai ceramici (17%), e infine dai metallici e compositi a parimeriti (8%). La scelta è dovuta alla loro leggerezza, alle proprietà meccaniche, alla versatilità, nonché alla loro compatibilità con le tecnologie a stampa 3D.

Nonostante la disciplina biomimetica trovi maggiore respiro nel nuovo continente, grazie al lavoro del Biomimicry Institute e alle risorse ad esso correlate, nell'ambito dell'interior design tutti i casi studio trovati, a eccezione di uno, sono stati progettati o prodotti in Europa, con una prevalenza in Olanda e in Italia, entrambe al 33%, seguite da Germania, Regno Unito, Spagna ed Emirati Arabi Uniti, ciascuno all'8,3%.

Il cuore della comparazione però è relativa alla tipologia di soluzione bioispirata. A tal proposito sono stati individuate tre categorie, che non di rado convivono nello stesso progetto: riduzione materica, monomatericità e struttura. La prima si basa sul principio naturale secondo cui tutto tende all'ottimizzazione. Infatti, poiché la materia e l'energia sono preziose, è naturale inclinazione optare per il maggior risparmio energetico attraverso la leggerezza e l'uso di materia solo dove necessario. Lo si evince dalla struttura ossea, che si modella a seconda di dove il carico da sopportare è maggiore, o dalla forma dei coralli. L'ispirazione strutturale solitamente si riferisce all'uso dei moduli presenti in Natura, riprodotti in progetti per ottenere

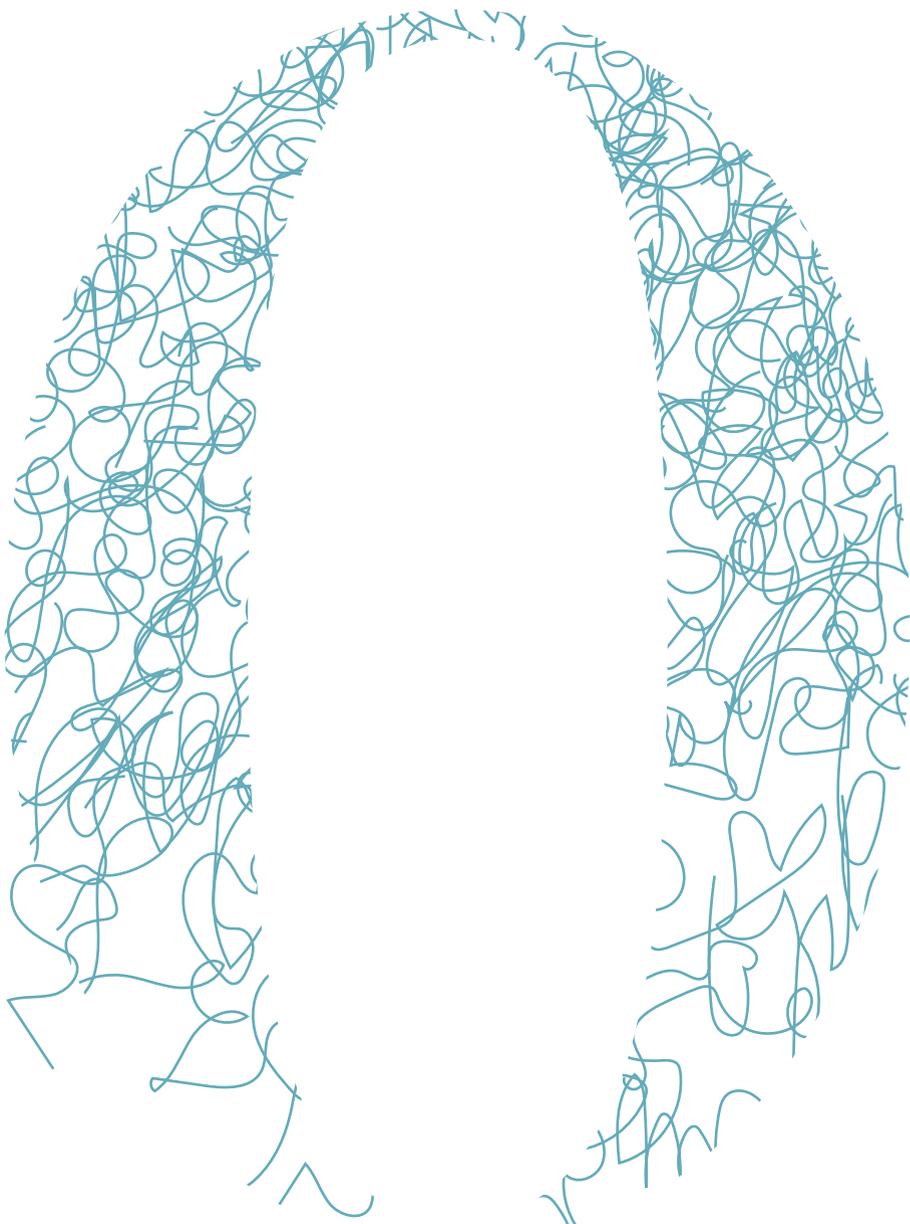
al contempo resistenza meccanica ed elasticità. Ne è un esempio la Coral Seating, che riproduce la struttura dei coralli. La monomatericità, invece, è positiva in un'ottica di produzione e dismissione del prodotto. Di particolare interesse in questo campo sono le sedute di Lilian van Daal, specialmente Biomimicry 3D Printed Soft chair, che si ispira alla costruzione modulare reiterata delle piante. Il corpo di un albero infatti è composto da unità replicate che insieme costituiscono l'architettura della pianta. Le cellule vegetali, a seconda dell'area in cui sono collocate, si dispongono in modo tale da favorire la resistenza meccanica rispetto all'elasticità e viceversa, pur mantenendosi uguali. A differenza della maggior parte degli animali, per i quali dividere significa distruggere l'individuo, le piante non possiedono degli organi centralizzati e per questo nel loro caso dividere significa moltiplicare.

In qualche modo le tre aree sono strettamente interconnesse, in quanto spesso la riduzione materica è legata all'ispirazione strutturale, ad esempio. Ne consegue che la distinzione tra queste categorie è un confine piuttosto labile. Allo stesso modo anche l'ispirazione è solitamente molto generica, più che a specie e comportamenti particolari, vengono trasposte leggi naturali generiche che stanno alla base della vita stessa. Di conseguenza non è nemmeno così netta la distinzione tra un'ispirazione tratta dal regno animale e vegetale. Anche quando la fonte viene dichiarata espressamente dal progettista, nulla toglie che le medesime leggi valgano anche per un'altra specie. Per esempio il

sellino per bicicletta è ispirato alle foglie e alla tela del ragno, ma la struttura segue il medesimo principio della boccetta di profumo Formula 1, ispirato ai rami degli alberi, e della Bone Chair che, come suggerisce il nome, riproduce una struttura ossea. Il lavoro svolto dall'Hybrid Design Lab rappresenta un'eccezione in tal senso.

A seguito di tali osservazioni è emerso che nel panorama attuale manca un'ispirazione che riprenda un comportamento o una strategia specifica di una specie e il cui prodotto riesca a distinguersi nell'offerta rispetto alla concorrenza, assai ampia in questo ambito.





# **GENERAZIONE DEL CONCEPT DI PROGETTO**





## 3.1 Define - La sfida progettuale

Il terzo capitolo della tesi è dedicato allo sviluppo di un progetto che coniuga le osservazioni emerse dall'analisi dello stato dell'arte e le conoscenze relative ai principi e alle metodologie su cui la biomimesi è basata. Si premette che il risultato si serve di una letteratura scientifica che in alcuni casi è stata sperimentata solo in laboratorio e pertanto non è stato possibile quantificare e valutare effettivamente il rendimento del progetto in condizioni naturali.

È innegabile che nel corso della storia il clima terrestre abbia subito notevoli variazioni. Negli ultimi 650.000 anni si sono verificati sette cicli di gelo e disgelo dei ghiacciai, giungendo all'ultima era glaciale avvenuta circa 7000 anni fa. Nel passato queste variazioni erano dovute a mutamenti dell'orbita terrestre che modificavano l'incidenza dei raggi sul Pianeta causando un innalzamento o abbassamento delle temperature. (NASA Team, 2022)

Dalla rivoluzione industriale in avanti l'uomo ha tuttavia innescato un circolo vizioso che ha dato vita a un problema

mai affrontato prima: l'origine antropica del cambiamento climatico. Studi riportano che l'aumento delle emissioni di gas serra ha causato un aumento delle temperature globali di 1°C dal 1900, registrando il decennio 2010-2020 come il più caldo di sempre (IPCC, 2022).

Di fatto i gas serra sono indispensabili per la vita sulla Terra. Questi infatti in condizioni normali trattengono i raggi solari, che vengono riflessi o evaporano dalla superficie terrestre, mantenendo la temperatura a un livello che permetta la sopravvivenza; tuttavia, se presenti in eccessive quantità, i gas serra impediscono al calore in eccesso di fuoriuscire dall'atmosfera, causando un innalzamento generale delle temperature. Una delle numerose conseguenze di questo fenomeno è l'evaporazione dell'acqua presente nei mari e oceani, chiamato feedback da vapore acqueo. Questo fenomeno è una conseguenza, non una causa del riscaldamento globale, ma certamente influisce nell'inasprire il problema, incrementando la percentuale di umidità presente nell'aria (Pasini, 2018).

Il riscaldamento globale sta causando anche lo scioglimento dei ghiacciai, il prosciugamento dei fiumi e dei laghi e la desertificazione, quindi una crescente siccità che riduce notevolmente le fonti di acqua dolce, già presenti in minori quantità. Si calcola che nel 2030 oltre 3 miliardi di persone, quasi metà della popolazione mondiale, potrebbero rimanere senz'acqua; tuttavia già oggi si contano 8 milioni di morti l'anno causate proprio dalla carenza d'acqua e dalle malattie legate alla mancanza di servizi igienico-sanitari e di acqua potabile (ANSA, 2022). Il nostro pianeta è ricoperto per il 70% dall'acqua, ma solo una quantità irrisoria, pari al 2,5%, è dolce (Geographic, 2020). Di questo 2,5%, il 68,9% è custodito dai ghiacciai e dalle nevi perenni, il 29% è confinato nel sottosuolo, dove convoglia in numerose falde sotterranee, profonde anche decine di metri, da cui si può prelevare acqua di elevata purezza e qualità, ma solo, se si hanno a disposizione le tecnologie necessarie. Ne consegue che solo lo 0,3% dell'acqua dolce, pari allo 0,008% della totalità dell'acqua presente sul Pianeta, è facilmente accessibile all'uomo, in fiumi o laghi (ANSA, 2022).

Con l'emergenza climatica la disponibilità di acqua potabile diventa di anno in anno più precaria. Sempre maggiori aree del pianeta stanno accusando problemi di siccità a causa dell'assenza di precipitazioni sia nei periodi estivi sia invernali.

In uno scenario come quello attuale urge cercare nuovi modi per accedere alle fonti idriche. Una via percorribile è la desalinizzazione dell'acqua salata; tuttavia al momento questa soluzione presenta alcune problematiche, infatti è costosa, produce scorie (per ogni litro di acqua desalinizzata c'è un residuo di 1,5 litri di salamoia) e consuma energia. Per dare un'idea, oggi nel mondo i dissalatori ricavano 95 milioni di metri cubi di acqua dolce, producendo al contempo 42 milioni di metri cubi di salamoia ipersalina al giorno. Rigettare questo scarto in mare altera la salinità, con un conseguente impatto negativo sugli ecosistemi marini e per questo è una soluzione poco raccomandabile. Parte di questo output di produzione offre comunque un'opportunità di impiego, come l'irrigazione di specie tolleranti al sale, l'acquacoltura e l'estrazione di sostanze nutritive per il terreno (magnesio, gesso, cloruro di sodio, di calcio, di potassio, di bromo, di litio) (Focus, 2019). Di conseguenza, proseguendo con le ricerche, parte delle problematiche possono senz'altro essere risolte e possono essere individuati altri possibili impegni delle scorie di produzione. Tuttavia un'altra opzione è rappresentata dall'acqua in cui siamo costantemente immersi, ma della cui presenza ci rendiamo conto solo in alcune circostanze, ossia l'umidità dell'aria.

## 3.2 Biologize - Dove rivolgere lo sguardo

Al fine di trovare una soluzione alla progressiva mancanza d'acqua a cui l'umanità andrà di questo passo incontro nei prossimi anni, è necessario domandarsi come la Natura si sia destreggiata nel percorso di sopravvivenza e adattamento alle condizioni più estreme in questo senso: i deserti. La ricchezza di fonti di vita in questi climi che non perdonano è la prova tangibile della straordinaria capacità di adattamento della Natura e della necessità di attingere ad essa per cercare un'alternativa alle fonti di acqua dolce tradizionali. Nelle numerose zone desertiche

che ricoprono questo pianeta si è testimoni di diverse soluzioni affinate da specie sia appartenenti al mondo animale sia vegetale. Alcune di queste adottano efficienti sistemi di immagazzinamento di liquidi che consentono loro di sopravvivere ad ampi lassi di tempo in mancanza di precipitazioni. Ne sono un esempio il cammello e il dromedario. Altre hanno sviluppato capacità di assorbire l'acqua dall'unica sorgente in grado di fornirla nel deserto: l'atmosfera. Altre ancora hanno acquisito entrambe le capacità.

## 3.3 Discover - Le specie da cui attingere

In natura diverse specie, parimenti appartenenti al mondo vegetale e animale, sono state capaci di adattarsi a condizioni estreme. Gli orsi polari e i pinguini vivono in un ambiente estremamente freddo e con assenza, o perlomeno scarsità, di luce per sei mesi l'anno, la cosiddetta notte polare, alcune specie viventi sono capaci di vivere nei fondali marini in totale assenza di luce e altre ancora hanno sviluppato nel corso di migliaia di anni la capacità di adattamento a zone aride e ad altissime temperature, spesso con notevoli escursioni termiche tra il giorno e la notte. Sopravvivere a un ambiente desertico richiede abilità inusuali: bisogna essere pronti a sopportare estremi termici che nella pianta possono raggiungere temperature superiori ai 70°C, si deve ottenere l'acqua necessaria alla sopravvivenza in un ambiente le cui precipitazioni medie annuali sono inferiori alla quantità di pioggia che cade a Londra in un qualunque giorno di aprile e, non da ultimo, bisogna essere in grado di difendersi dagli animali che vogliono usarle come cibo (Mancuso, 2017). In simili condizioni diverse specie,

animali e vegetali, si sono adattate evolvendo sofisticati sistemi di immagazzinamento e risparmio delle risorse idriche approvvigionate. Il fico d'india e diverse specie appartenenti alla famiglia delle Cactacee hanno volto a proprio vantaggio condizioni ambientali proibitive grazie a metamorfosi così radicali da trasformare la struttura stessa della pianta: Le Cactacee, infatti, sono prive di foglie, che tradizionalmente costituiscono la sede della fotosintesi, in quanto costituiscono anche la parte del corpo che consuma maggiori quantità d'acqua. Tramite la soppressione delle foglie e il trasferimento della funzione fotosintetica all'interno del fusto, il fico d'india rimuove la principale fonte di spreco dei liquidi. Ma le sorprese non finiscono qui. La stessa fotosintesi è modificata per rispondere alle esigenze estreme di risparmio idrico. Le Cactacee presentano un adattamento per cui l'acquisizione dell'anidride carbonica attraverso l'apertura degli stomi, la cui gestione costituisce un problema già a priori, avviene di notte, quando le condizioni ambientali sono più favorevoli. In generale più gli stomi sono aperti, maggiore



23. Piante di fico d'India, famiglia delle Cactacee, da [aziendascollosebastiana.it](http://aziendascollosebastiana.it)



24. Agave, da [unsplash.com](https://unsplash.com)

è la quantità di  $\text{CO}_2$  che fa ingresso nella pianta; tuttavia la loro apertura favorisce la fuoriuscita di vapore acqueo e per tale ragione la pianta deve ponderarne l'apertura e chiusura in funzione delle diverse variabili ambientali. Così, a differenza di quanto accade nelle altre specie, per le quali l'acquisizione dell'anidride carbonica e la sua fissazione per mezzo della fotosintesi sono contemporanee e avvengono nelle ore diurne, alla presenza di luce, nelle piante che ricorrono al ciclo CAM (da *Crassulacean acid metabolism*) l'ingresso di  $\text{CO}_2$  e la sua trasformazione in zuccheri si succedono: l'assorbimento avviene di notte, la fissazione di giorno. Poiché una certa quantità d'acqua inevitabilmente viene consumata durante il processo, è necessario trovare una fonte alternativa al suolo. Le spine sottilissime che ricoprono i fichi d'India non servono solo come difesa dai predatori, ma sono anche un eccellente strumento per condensare l'umidità atmosferica. Questa è intrappolata dalle spine e convogliata in gocce sempre più grandi all'interno dei cladodi, che, fra le numerose funzioni, svolgono anche quella di principale riserva idrica della

pianta (Mancuso, 2017).

Soluzioni simili sono state adottate da numerose altre specie, sia animali sia vegetali. È il caso dell'agave, delle geofite erbacee, della *welwitschia mirabilis* e dei coleotteri delle nebbie, o coleotteri del Namib.

L'agave fa parte delle succulente a rosetta e costituisce un gruppo eterogeneo di piante che si sono insediate con successo negli ecosistemi desertici, soprattutto alle altitudini in cui si formano le nuvole. La struttura a foglie larghe disposte su più strati in modo concentrico consente di immagazzinare grandi volumi d'acqua dalla pioggia e dalla nebbia. La singolare superficie delle loro foglie, ricoperta da uno strato ceroso, consente loro da una parte di raccogliere generose quantità d'acqua dalla pioggia e dalla nebbia, dall'altra funge da barriera alla perdita di acqua. Grazie alla disposizione concentrica delle grandi foglie e alla loro relativa leggerezza, le gocce d'acqua vengono catturate da una bolla d'aria in lento movimento che circonda la foglia e in seguito dirette lungo

la superficie liscia. La forma a imbuto, invece, convoglia l'acqua raccolta verso le radici. Arricciandosi e roteando, le piante aumentano la varietà di orientamento delle loro foglie, migliorando le probabilità che le gocce di nebbia le incontrino e vi si attacchino (Ask Nature, Leaves Capture Water From Fog, 2022).

Le geofite erbacee popolano invece l'arida regione del Namaqualand in Sudafrica, nota come "paese dei ricci". Queste piante perenni (germogliano da bulbi) presentano un'ampia varietà di forme. Molte di queste sono contorte, spiraliformi, con bordi ondulati e configurazioni fogliari insolite, oppure presentano una peluria superficiale. Questa varietà di soluzioni nasce da millenni di perfezionamento evuzionistico convogliato verso un unico scopo: reperire acqua dalla primaria fonte di quel territorio, l'aria. Per le geofite sudafricane l'obiettivo non è tanto quello di conservare l'acqua, quanto piuttosto quello di catturarla e convogliarla alle radici. L'aria contiene comunemente



25. *Albucca spiralis*, da [venditapianteonline.it](http://venditapianteonline.it)

acqua in due forme principali: come gas (noto come vapore acqueo) e come liquido in minuscole goccioline in sospensione. Quando l'aria ricca di vapore acqueo tocca una superficie più fredda, il vapore può condensare e formare goccioline liquide lungo la superficie più fredda. Come l'erba di un campo o di un prato, le geofite sudafricane si raffreddano di notte rilasciando il calore del sole diurno nell'aria. Così facendo si creano le condizioni adatte alla condensazione dell'acqua sotto forma di rugiada. Tuttavia le geofite hanno ulteriormente perfezionato questa strategia in diversi modi; innanzitutto la struttura contorta e la peluria accelerano il rilascio di calore, consentendo loro di raccogliere più acqua; inoltre i vortici e i peli aiutano a catturare anche l'acqua contenuta nella nebbia. Questo perché la capacità di una particolare superficie di raccogliere le gocce di nebbia dipende da come è fatta, dall'estensione della superficie e dall'orientamento rispetto alla fonte di umidità. Le superfici ampie tendono a raccogliere più umidità di quelle strette, mentre quelle perpendicolari al flusso d'aria tendono a raccogliere più



26. Welwitschia mirabilis, da angolodellamicizia.forumfree.it



27. Coleottero delle nebbie, da flickr.com

di quelle parallele ad esso. La presenza dell'acqua sulle foglie aiuta le piante in tre modi. In primo luogo, riduce la quantità di acqua che perdono dall'interno dei loro tessuti. In secondo luogo, una parte dell'acqua può essere assorbita direttamente dal tessuto fogliare. In terzo luogo, una parte dell'acqua gocciola sul terreno sotto la pianta, dove le radici possono assorbirla e renderla disponibile per la fotosintesi (Ask Nature, 2016).

Altre interessanti soluzioni si possono trovare osservando le specie che abitano il deserto della Namibia, uno degli ambienti aridi più antichi del Pianeta. Si stima infatti che, a differenza di altri deserti, come il Sahara, che hanno subito grandi oscillazioni tra periodi secchi e periodi umidi negli ultimi centomila anni, quello del Namib sia irrimediabilmente arido da almeno 80 milioni di anni. Questo lungo lasso di tempo ha perciò permesso l'evoluzione di numerose specie, che si sono adattate alla sua aridità imparando a usare l'acqua contenuta nella nebbia, data la sua vicinanza con l'oceano (Mancuso,

2017).

La Welwitschia mirabilis, comunemente nota come l'“ornitorinco delle piante” fa parte di questo gruppo. Questa pianta produce due sole foglie che possono raggiungere anche i cinque metri di lunghezza ed è estremamente longeva. Si calcola che alcuni esemplari abbiano duemila anni e il suo nome in afrikans, *tweeblaarkanniedood*, significa proprio “due foglie che non muoiono mai. La sua sopravvivenza non dipende dalla lunghezza delle sue radici, come si è erroneamente creduto per molto tempo, quanto piuttosto alla capacità delle foglie porose di assorbire goccioline d'acqua prodotte dalla condensazione atmosferica delle nebbie (Mancuso, 2017).

Passando al regno animale, si nota che il coleottero del Namib adotta un sistema simile. Questo singolare insetto, alzando l'addome a un'inclinazione di 23°, espone le sue elitre alla brezza proveniente dal mare. Le sue ali presentano due importanti caratteristiche, essenziali

per la sua sopravvivenza in un ambiente ostile. Da una parte la loro superficie presenta protuberanze idrofile che si alternano a conche idrofobiche. L'acqua contenuta nella nebbia, scontrandosi sulla superficie delle elitre, si accumula sulle cime fino a quando la goccia raggiunge una dimensione tale da scivolare nelle valli. Queste cavità idrofobiche, agevolate dalla forza di gravità, fungono da canale di direzionamento dell'acqua verso la bocca dell'insetto, che così può dissetarsi. Ma le sorprese non finiscono qui. Fino a poco tempo fa, infatti, si pensava

che il coleottero potesse approvvigionare acqua solamente dalla nebbia, le cui particelle hanno un diametro compreso tra i 3 e i 20  $\mu\text{m}$  e pertanto sono reperibili con maggiore facilità; tuttavia recentemente è stato scoperto che l'insetto è capace di ricavare acqua anche dall'umidità grazie a una particolare qualità delle elitre, l'alto indice di raffreddamento radiativo, che consente di mantenere un differenziale di temperatura tra quella atmosferica e quella sulla superficie delle ali (Guadarrama-Cetina, et al., 2014).

## 3.4 Abstract - La sfida per cui si progetta

In questa fase di progettazione si richiede di esplorare con maggiore cura i meccanismi e il funzionamento degli aspetti ritenuti rilevanti delle bioispirazioni selezionate. Inoltre è previsto un ulteriore approfondimento delle condizioni in cui il progetto andrà a operare al fine di verificarne la compatibilità con le ispirazioni.

### 3.4.1 Punto di rugiada, rugiada e nebbia

Nebbia e rugiada sono condizioni atmosferiche strettamente correlate, ma la cui differenza risulta sostanziale per la comprensione delle potenzialità e dei limiti derivanti da una progettazione biomimetica riguardo a questo argomento. La nebbia è un fenomeno meteorologico consistente in un ammasso di goccioline di acqua, che si formano in prossimità del suolo o sopra il mare e i laghi o lungo i fiumi per condensazione di vapore d'acqua. Le goccioline d'acqua devono avere un diametro che varia tra i 5 e i 10

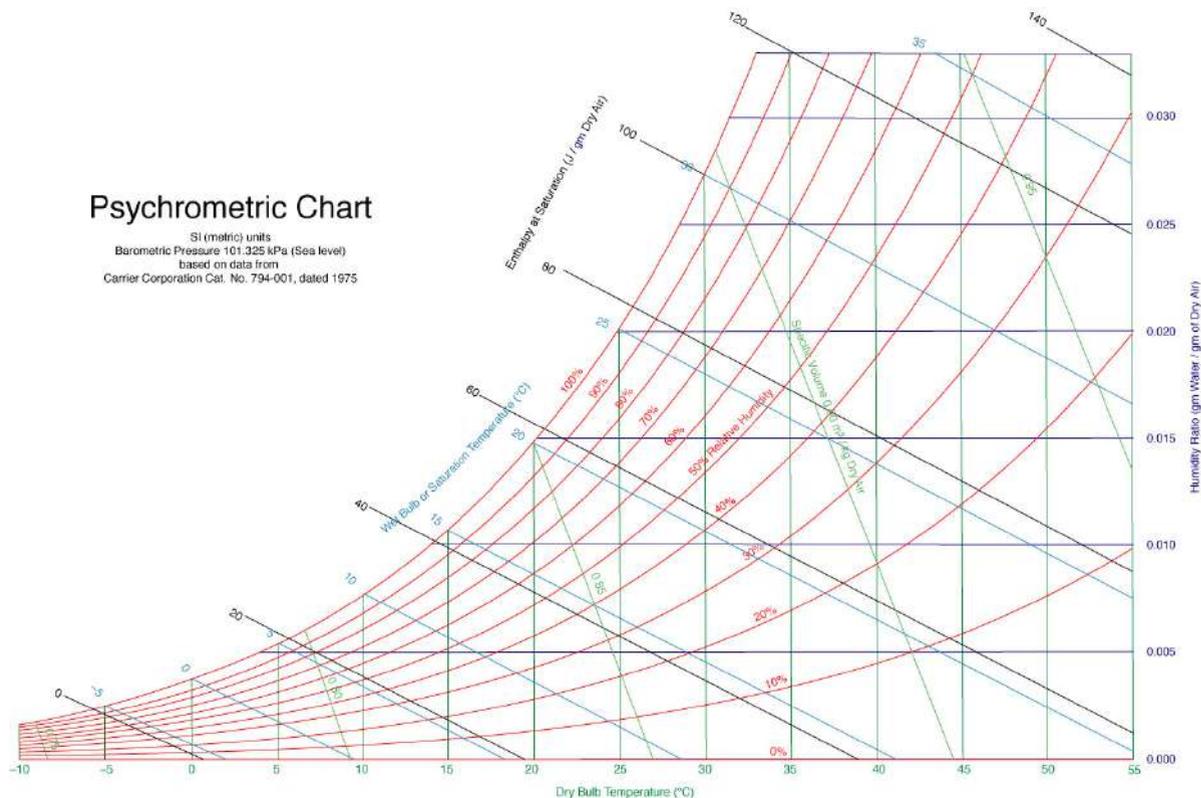
micron. Perché la nebbia si formi è necessario che l'umidità dell'aria sia molto alta, intorno al 100%, ossia quando il vapore acqueo contenuto nell'aria raggiunge il punto di saturazione. A seconda delle condizioni attraverso cui la nebbia si forma, questa viene classificata in modi differenti. La nebbia da avvezione si forma quando l'aria umida passa per un movimento orizzontale dei flussi d'aria sopra il terreno freddo e viene così raffreddata. Questo fenomeno è frequente sul mare quando l'aria tropicale incontra ad alte latitudini acqua più fredda. È anche comune nel caso in cui un fronte tiepido passi sopra un'area abbondantemente innevata, oppure quando si verifica una forte escursione termica. La nebbia si dissolve non appena il sole, al mattino, comincia a scaldare l'aria.

La nebbia da irraggiamento si verifica generalmente dopo il tramonto, quando la temperatura del suolo inizia a diminuire, cedendo calore all'aria. Successivamente, anche l'aria sovrastante si raffredda e il vapore acqueo in essa contenuto condensa, originando la nebbia.

La nebbia da umidificazione è una formazione di nebbia

## Psychrometric Chart

SI (metric) units  
Barometric Pressure 101.325 kPa (Sea level)  
based on data from  
Carrier Corporation Cat. No. 794-001, dated 1975



28. Diagramma psicrometrico, da Wikipedia. Incrociando la temperatura a bulbo secco (verde) e l'umidità relativa (rosso), è possibile individuare la temperatura di saturazione (azzurro)

molto localizzata. Avviene quando l'aria fredda passa su una superficie d'acqua molto più calda. Il vapore acqueo entra velocemente nell'atmosfera tramite l'evaporazione, dando origine a un banco di nebbia.

La nebbia ghiacciata è una tipologia di nebbia in cui le goccioline d'acqua sono congelate a mezz'aria in minuscoli cristalli di ghiaccio. Generalmente la sua formazione richiede temperature ben al di sotto del punto di congelamento e quindi è un tipo di nebbia comune solo nei dintorni delle regioni polari. La Nebbia frontale (o nebbia da precipitazione) si forma quando una precipitazione cade sull'aria secca dietro alla nube e le goccioline liquide evaporano. In seguito, quando il vapore acqueo si raffredda

e, raggiunto il punto di rugiada, condensa, dà origine alla pioggia (Pardini, 2018).

La rugiada invece è una "precipitazione atmosferica costituita dalla condensazione del vapore acqueo atmosferico sui corpi al suolo, causata dal raffreddamento conseguente all'irradiazione terrestre notturna; è un fenomeno caratteristico delle notti serene, più evidente sulle foglie dei vegetali perché su queste si condensa anche il vapore da esse stesse emesso". (Treccani E., s.d.) Perché si verifichi il passaggio di stato, è necessario che si raggiunga il cosiddetto "punto di rugiada" o *dew point*. Questo è un parametro meteorologico che indica la

temperatura alla quale, a pressione costante, l'aria (o, più precisamente, la miscela aria-vapore) diventa satura di vapore acqueo.” (CEMER, 2015)

In altre parole, il punto di rugiada è la temperatura al di sotto della quale il vapore acqueo condensa sotto forma di rugiada. Più la temperatura è alta, maggiore è il vapore acqueo che l'aria è in grado di assorbire. Ne consegue che, nel momento in cui la temperatura diminuisce, si riduce anche la capacità dell'aria di assorbire l'umidità, condensando il vapore acqueo in forma di liquido. Il punto di rugiada dipende da due parametri fondamentali, la temperatura e l'umidità relativa, con cui si intende il rapporto tra la quantità di vapore contenuto da una massa d'aria e la quantità massima (cioè a saturazione) che il volume d'aria può contenere nelle stesse condizioni di temperatura e pressione.

Qualora l'umidità relativa sia molto inferiore al 100% il ruolo determinante al raggiungimento del valore richiesto del punto di rugiada è rappresentato dalla temperatura superficiale dell'oggetto. Se la superficie ha una temperatura necessaria a garantire il  $\Delta T$  necessario, il vapore acqueo condensa su di essa.

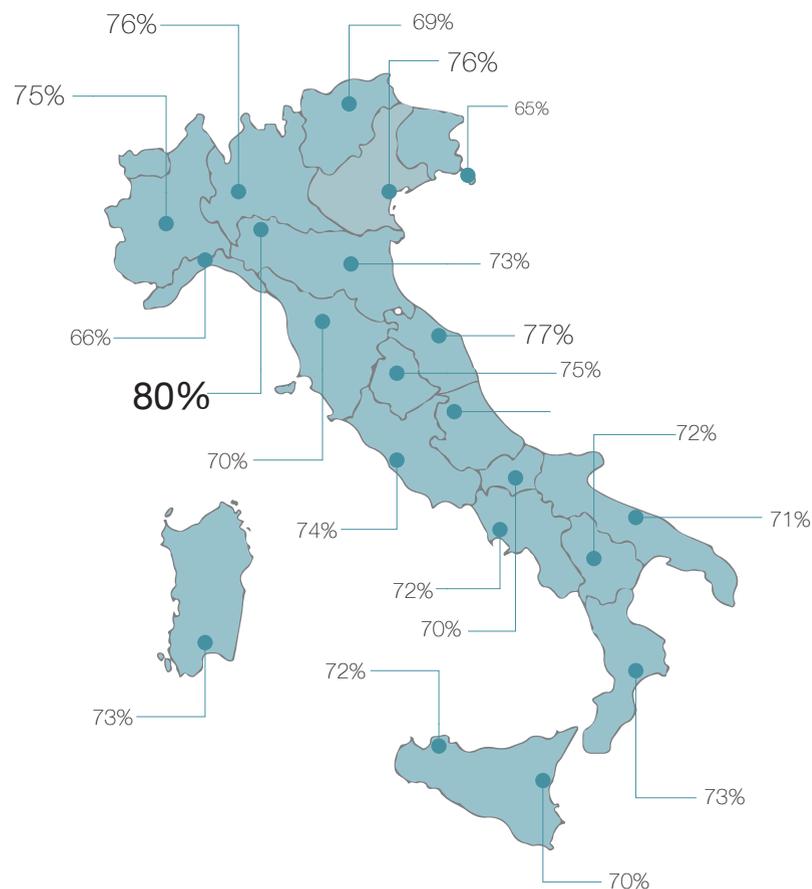
Ne consegue che la nebbia è aria che contiene già al suo interno gocce d'acqua condensate, mentre per ottenere la rugiada è necessario un cambiamento di stato da vapore a liquido. Osservando il fenomeno in un'ottica di progettazione, bisogna considerare che nel primo caso il raggiungimento del cosiddetto punto di rugiada

è demandato a un fenomeno naturale esterno; la nebbia è già presente e deve “solo” essere immagazzinata. Nel caso della rugiada, invece, è richiesto un ulteriore sforzo progettuale poiché il materiale del prodotto in questione deve mantenere sulla superficie la differenza di temperatura necessaria affinché si arrivi al punto di rugiada in un ampio spettro di temperature e di percentuali di umidità.

### 3.4.2 Uso dell'acqua dolce nel mondo

Il seguente progetto si pone come obiettivo di ricavare acqua dolce sfruttando l'umidità presente nell'aria per poi immagazzinarla. È necessario dunque fare una riflessione sulle tipologie di potenziale impiego della condensa ottenuta. Come già precedentemente illustrato, solo il 2,5% dell'acqua totale presente sul Pianeta è dolce. Di questo 2,5% solo lo 0,3%, pari allo 0,008% del totale è facilmente accessibile all'uomo. Le risorse idriche di cui disponiamo vengono inoltre impiegate in modo eterogeneo e in percentuali molto diverse tra loro a seconda dell'uso. Dello 0,3% di cui si parlava sopra, circa l'8% viene utilizzato per il consumo umano e il settore dei servizi. L'agricoltura, con il suo 70%, rappresenta l'ambito di maggiore impiego, seguito dall'industria (22%).

Questi dati evidenziano che la maggior parte dell'acqua a disposizione viene usata nel settore primario e secondario, privando così l'uomo di un bene essenziale per la sua



29. Rappresentazione grafica dell'umidità relativa media registrata in Italia nel 2017

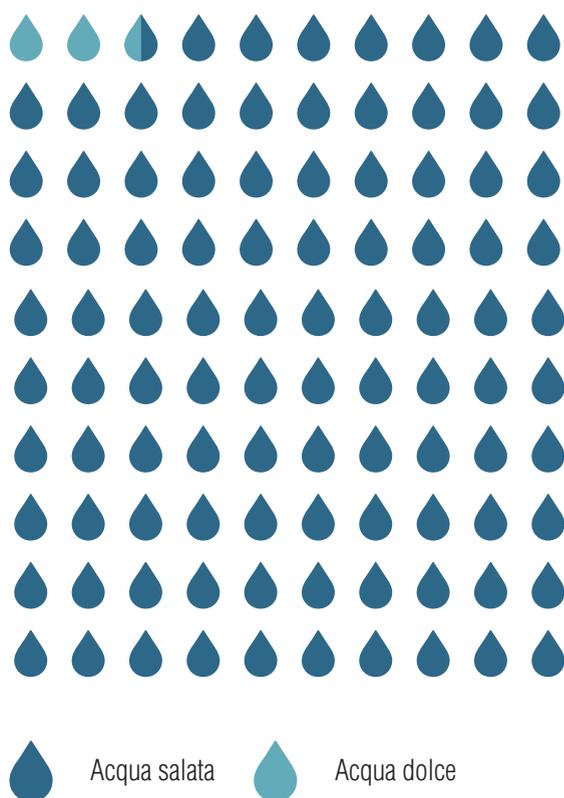
sopravvivenza; un bene che scarseggia sempre di più a causa dei cambiamenti climatici. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) il fabbisogno personale giornaliero è di circa 50 litri, un diritto a cui tutta la popolazione mondiale dovrebbe avere accesso, sancito come 6° obiettivo dell'Agenda 2030 per uno sviluppo sostenibile.

Poiché l'acqua potabile necessita di requisiti chimici specifici, che non possono essere interamente garantiti da una condensazione naturale, nonostante il processo in sé già in parte liberi il vapore acqueo di alcune sostanze presenti nell'aria, il progetto in questione si pone l'obiettivo di agire trasversalmente all'approvvigionamento dei 50 litri giornalieri, alleggerendo il carico di responsabilità ricoperto

dalle fonti accessibili di acqua dolce e contribuendo all'ottenimento di parte del quantitativo richiesto in ambito agricolo e, in generale, di irrigazione di piante. (Gruppo CAP, 2021)

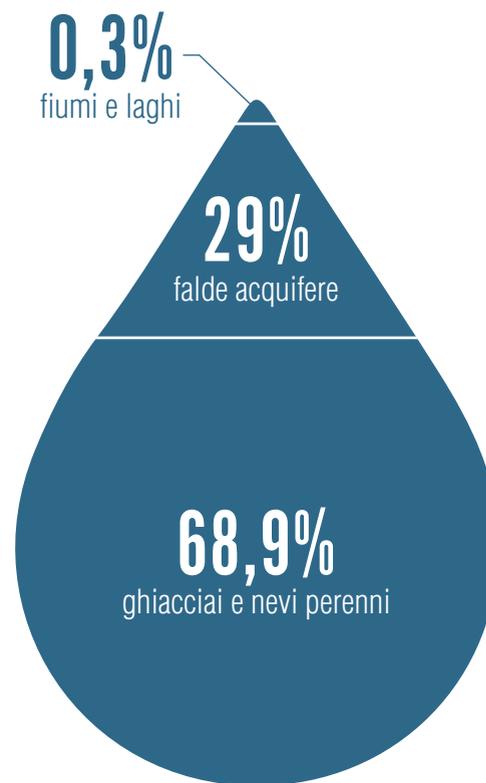
### 3.4.3 Il clima in Italia

Affinchè il dispositivo funzioni al meglio, è necessario scegliere una locazione geografica che presenti le caratteristiche adatte. Usando come linee guida le considerazioni emerse dallo studio dell'umidità relativa e del punto di rugiada, il luogo in questione deve offrire un clima sufficientemente umido, affinché la percentuale di umidità relativa sia il più vicino possibile al valore di



30. Rapporto tra acqua dolce e salata nel mondo

saturatione dell'aria. Le aree del Pianeta idonee sono diverse, da quelle tropicali a quelle in prossimità di mari e laghi, purché non siano eccessivamente ventilate in quanto il vento asciuga l'aria, privandola del vapore acqueo di cui il progetto necessita per funzionare. È indubbio che i climi tropicali, situati nell'area equatoriale, come la Thailandia, l'India, la Bolivia, hanno i requisiti necessari. È altresì vero che il clima tropicale viene classificato in tre sottogruppi, che tra loro presentano caratteristiche molto diverse, il clima equatoriale, monsonico e della savana. Il primo presenta caratteristiche climatiche costanti durante l'anno, con un tasso di umidità relativa molto alto causato dalle abbondanti piogge (Wikipedia, Clima tropicale, 2022). Il clima della savana prevede l'alternanza di mesi aridi e secchi, tendenti al desertico, ad altri con

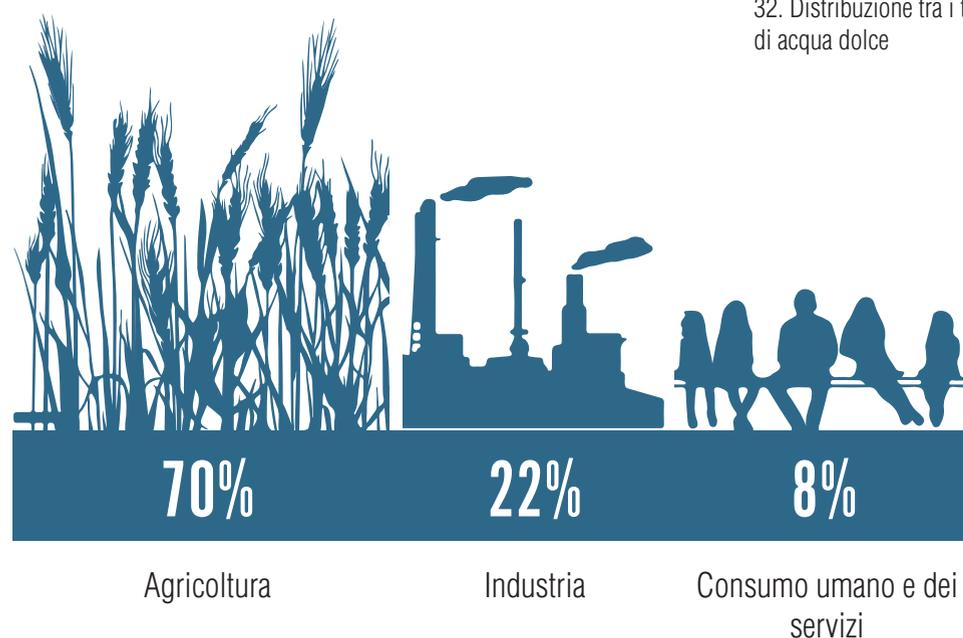


31. Ripartizione dell'acqua dolce

abbondanti precipitazioni, la cosiddetta stagione delle piogge (Wikipedia, Clima della savana, 2021). Il clima monsonico è molto simile a quello della savana; alterna sei mesi umidi a sei mesi secchi, ma con condizioni meno estreme (Wikipedia, Clima monsonico, 2020). I periodi umidi presentano di certo le caratteristiche adatte al funzionamento del dispositivo; tuttavia sorge spontaneo chiedersi se sia sensato impiegare un dispositivo in un'area e in un periodo in cui le precipitazioni sono abbondanti e non c'è un reale bisogno. È vero che può essere usato per immagazzinare acqua affinché questa venga usata all'occorrenza, cioè durante i periodi di siccità, ma è legittimo chiedersi se non sia meglio ricercare condizioni adatte laddove c'è il rischio che le siccità diventino più frequenti e costanti. Negli ultimi anni, ad esempio, l'Italia è

stata colpita da lunghi periodi di scarsità, se non addirittura assenza, di precipitazioni, causando danni all'agricoltura con tutte le conseguenze che ne seguono. Per la sua posizione, situata nel cuore del mar Mediterraneo, la Penisola italiana accusa un clima piuttosto umido; tuttavia, data la presenza di correnti ventose sparse per tutta la Penisola che portano via il vapore acqueo, la presenza del mare non è da ritenersi la principale causa di questa caratteristica; Trieste, le Bocche di Bonifacio, il canale di Otranto e lo Stretto di Messina, classificate come le località più ventose d'Italia, hanno infatti bassi tassi di umidità. D'altro canto il Paese lungo tutto il territorio è ricco di zone anticamente paludose e successivamente bonificate, la Pianura Padana, l'Agro Pontino, la Maremma ne sono un esempio. Nonostante l'azione dell'uomo nel plasmare il territorio a suo piacimento, queste aree rimangono comunque umide. Di seguito è riportato un grafico con le percentuali di umidità relativa, registrate nel 2017 dall'Aeronautica Militare, nelle principali città d'Italia. Da qui si può notare che l'umidità relativa media si aggira

intorno al 74%, con un picco dell'80% a Piacenza. Il dato di per sé ha bisogno di un'ulteriore analisi, poiché per definire il punto di rugiada è necessario rapportare il dato alla temperatura. Si consideri per esempio l'area padana, caratterizzata da inverni freddi e umidi, particolarmente soggetti a nebbia, ed estati calde e afose. Nel primo caso la nebbia può offrire una valida fonte di approvvigionamento, mentre nel secondo caso, in virtù di una temperatura media di 30°C e un'umidità relativa dell'80%, il punto di rugiada viene raggiunto intorno ai 26°C, con una differenza di temperatura di soli 4°C. Un discorso simile vale per le città che sorgono in prossimità dei grandi laghi del nord Italia. Il territorio italiano offre un clima piuttosto variegato, passando da climi alpini, a temperati, a mediterranei (IgroDry, 2022). Tuttavia escludendo dalle considerazioni le aree con un clima alpino, in generale l'alto tasso di umidità relativa offre un buon margine di intervento da parte del dispositivo che questa tesi si propone di sviluppare.



## 3.5 Abstract - Analisi delle capacità del coleottero del Namib

### 3.5.1 Zone idrofobiche e idrofiliche

Il deserto del Namib è popolato da una consistente varietà di coleotteri, appartenenti alla famiglia dei Tenebrionidi. Alcuni di questi costruiscono trincee o creste di sabbia, altri usano il loro stesso corpo, assumendo la posa nota come fog-basking, per nebulizzarvi la nebbia. Assumendo sulla cima delle dune questa posizione, che consiste nel rivolgere la testa in direzione contraria al vento e alzare il posteriore, l'acqua contenuta nella nebbia viene accumulata sulle elitre fino a scendere verso la bocca dell'insetto, che si abbevera. Il beneficio fornito da questa tecnologia è evidente, soprattutto se collocato nel suo contesto. Il deserto del Namib è infatti uno dei più antichi e aridi sulla Terra, con una media di precipitazioni annue di 10 mm. Il segreto della sopravvivenza della flora e fauna che ospita risiede proprio nella sua vicinanza con l'Oceano Atlantico, lungo il quale il deserto si snoda e che conferisce la tanto preziosa umidità da cui le nebbie hanno origine. Studi a lungo termine condotti sulla densità di popolazione dei

coleotteri mostrano con chiarezza che le specie che usano la tecnica del fog-basking resistono anche ai periodi di scarse precipitazioni, mentre i coleotteri che non possiedono questa tipologia di adattamento si riducono a meno dell'1% della loro abbondanza media. Il meccanismo con cui l'acqua nebulizzata si forma in grandi gocce su una superficie perlinata è stato descritto dallo studio delle elitre di coleotteri del genere *Stenocara*. Si ritiene che le strutture alla base di questo processo siano costituite da picchi idrofili circondati da aree idrofobe; l'acqua trasportata dalla nebbia si deposita sui picchi idrofili delle protuberanze lisce sull'elitre del coleottero e forma goccioline a crescita rapida che, una volta sufficientemente grandi da muoversi contro il vento, scivolano verso la testa.

Lo studio condotto da Thomas Nørgaard e Marie Dacke prende in esame quattro specie di Coleotteri del Namib, *O. unguicularis*, *O. laeviceps*, *S. gracilipes* e *P. cribripes*, che presentano strutture superficiali differenti sulle elitre, al fine di dimostrare se una soluzione sia più efficiente delle altre; infatti alcune mostrano elitre lisce con scanalature



33. Illustrazione della raccolta dell'acqua sfruttando le cime idrofiliche e le valli idrofobiche delle elitre

superficiali, oltre le numerose protuberanze simili a quelle riscontrate nello *Stenocara*. Gli esperimenti condotti in laboratorio hanno dimostrato che vi era una maggiore efficienza di alcune soluzioni rispetto alle altre, ma non tanto nette da essere considerate rilevanti al fine di una progettazione bio-ispirata. In generale, infatti la nebbia che si deposita sulle maglie di uno schermo nebbiogeno artificiale durante una giornata nel deserto del Namib può portare alla raccolta di un litro d'acqua per metro quadro (Nørgaard & Dacke, 2010).

### 3.5.2 Alta emissività IR

Studi successivi hanno condotto a un'ulteriore scoperta sulle potenzialità nella raccolta dell'acqua del coleottero del Namib che offre spunti ancora più interessanti nell'ottica

di una progettazione bioispirata. Infatti, le ricerche del gruppo Guadarrama-Cetina et al. hanno rivelato che questi insetti sono anche capaci di ricavare il quantitativo idrico necessario inducendo alla condensazione l'umidità presente nell'aria attraverso il fenomeno di nucleazione, ossia la formazione, a partire da una fase solida, liquida o gassosa, di aggregati di atomi o molecole (detti nuclei) di un'altra fase, in grado di accrescersi fino a produrre particelle di dimensione microscopica o superiore. (Treccani, 2008). Il lavoro condotto da Parker e Lawrence (Guadarrama-Cetina, et al., 2014) aveva evidenziato il possibile ruolo delle microstrutture idrofile e idrofobiche per migliorare la raccolta delle gocce d'acqua, attribuendo la raccolta alle proprietà idrofile delle protuberanze e il direzionamento alle caratteristiche idrofobe delle valli intermedie. L'acqua si accumula sulla sommità delle protuberanze e, quando il suo

volume è sufficientemente grande, le gocce scivolano lungo la superficie idrofobica verso la bocca dell'insetto. Il loro studio è stato il punto di partenza per ulteriori indagini su nanomateriali con proprietà umettanti miste per migliorare l'efficienza di raccolta dell'acqua. Tuttavia, ulteriori studi su coleotteri viventi hanno dimostrato che i tenebrionidi che mostrano un comportamento di raccolta della nebbia possiedono piuttosto una superficie idrofobica uniforme e liscia delle loro elitre e che, come osservato dallo studio di Thomas Nørgaard e Marie Dacke, la presenza o meno delle tipiche protuberanze non è da ritenersi un fattore determinante per un'efficiente raccolta dell'acqua. Pertanto, la microstruttura delle elitre potrebbe non essere il parametro principale per la raccolta della nebbia, ma piuttosto secondario alla postura dell'insetto, che assume un angolo costante di  $23^\circ$  con l'orizzonte. Lo studio condotto, tuttavia, porta alla luce un'ulteriore capacità dell'insetto che potrebbe rendere ancora più fruttuosa ed efficiente la bio-ispirazione, cioè l'abilità di non solo raccogliere l'acqua dalla nebbia, ma anche di indurre alla condensazione l'umidità dell'aria, ottenendo così rugiada. Si ricorda che la nebbia è formata da gocce d'acqua liquida con un diametro dell'ordine di  $10\ \mu\text{m}$ . Al contrario, la rugiada comporta la condensazione del vapore acqueo su una superficie in seguito a un processo di nucleazione eterogenea che dipende dalla sovrasaturazione del vapore, dalle proprietà di bagnatura e dalle eterogeneità chimiche e geometriche della superficie. È lecito dunque domandarsi se la rugiada possa

formarsi sul dorso di un insetto, considerando che questo non possiede capacità di termoregolazione, che le ali sono piuttosto isolate, data la loro separazione dal corpo, e che il punto di rugiada si raggiunge con un'umidità del 100%. Il clima in cui vive il coleottero è caratterizzato da due stagioni di umidità media notturna elevata, da settembre a marzo, intorno al 60-80%, e ridotta, da aprile ad agosto, intorno al 45-56%. La temperatura media notturna è di circa  $18^\circ\text{C}$  quando l'aria è umida e di  $15^\circ\text{C}$  quando è secca. Considerando queste condizioni, la rugiada può verificarsi con una differenza di temperatura tra l'aria e il punto di rugiada di  $10^\circ\text{C}$  in corrispondenza di un'umidità relativa superiore al 55%. Di seguito si riportano le condizioni in cui l'esperimento è stato svolto.

L'emissività IR delle elitre è stata determinata nel dominio delle lunghezze d'onda tra  $8\text{-}14\ \mu\text{m}$  (la finestra atmosferica) con un pirometro a scansione con risoluzione di temperatura di  $\pm 0,5\ ^\circ\text{C}$ . Insieme alla seconda parte dell'elitra è stata utilizzata una sezione di cartone con la stessa forma dell'elitra e con emissività nota 0,81. In una prima serie di esperimenti, la sezione di cartone e l'elitra sono state fissate con grasso termoconduttivo su un pezzo di vetro ad alta emissività (0,93). Il vetro stesso è stato fissato con grasso termoconduttivo su un disco di rame elettrolitico per un'elevata conduzione di calore. Il disco è entrato in contatto con il lato freddo di un elemento Peltier. Il lato caldo di questo elemento Peltier è stato collegato a un bagno d'acqua a temperatura regolata

( $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ). La temperatura ambientale è stata impostata a  $22^{\circ}\text{C}$  e quella del disco a  $12^{\circ}\text{C}$ . In questa prima serie di esperimenti, il pirometro non ha rilevato alcuna differenza di temperatura tra l'elitra e il vetro, indicando così che l'elitra ha un'emissività vicina a quella del vetro. Negli altri esperimenti, al posto del vetro è stata utilizzata una sezione di foglio di alluminio a bassa emissività (0,25). In questo caso, l'elitra è stata ben rilevata dal pirometro, in accordo con un'emissività molto maggiore del foglio di alluminio. L'analisi degli esperimenti in termini di emissività ha fornito i seguenti valori per le diverse superfici studiate. L'incertezza era di  $\pm 0,07$ . Vetro: 1; pellicola di alluminio: 0,28; cartone: 0,76; elitra: 0,95. La coerenza tra le emissioni misurate e quelle previste per vetro, cartone e film di alluminio conferma l'accuratezza delle misure. In un momento successivo è stato condotto un secondo esperimento, i cui risultati sono in qualche modo enfatizzati poiché per ragioni pratiche è stato necessario operare in condizioni di sovrasaturazione rispetto all'ambiente reale, il deserto del Namib.

Una sezione dell'elitra è stata fissata con una sostanza oleosa termoconduttiva a un disco di rame e posta all'interno di una camera di condensazione di forma cilindrica. Su pareti opposte della camera erano presenti due ugelli da cui usciva un flusso d'aria satura d'acqua. Perpendicolarmente a questi due erano presenti altrettanti ugelli in uscita, mentre l'elitra unita al disco di rame era posta al centro della camera. La temperatura del disco di

rame poteva essere regolata tra  $4^{\circ}\text{C}$  e  $14^{\circ}\text{C}$  per garantire la condensazione del vapore acqueo. La temperatura misurata sull'elitra con una termocoppia molto sottile era uguale a quella del disco di rame entro un massimo di  $1^{\circ}\text{C}$ . Aprendo gli ugelli si è riscontrata una maggiore velocità di condensazione sulle depressioni anziché sulle cime che poteva essere attribuita a un effetto termico, oppure a una differenza nella barriera di nucleazione. Nel primo caso le valli potevano accusare una temperatura più bassa rispetto alle protuberanze dovuta alla maggiore vicinanza delle prime al disco di rame, responsabile del raffreddamento, e a un minore scambio termico con l'atmosfera circostante, che aveva una temperatura più alta. Nella seconda ipotesi, invece, la nucleazione nelle valli poteva essere maggiore rispetto alle protuberanze.

È stato rilevato inoltre che le forme delle gocce d'acqua nelle valli apparivano più irregolari rispetto alle protuberanze, il che corrispondeva a un angolo di contatto minore e/o a una maggiore isteresi dell'angolo di contatto. Gli effetti termici e dell'angolo di contatto sono stati studiati in ulteriori esperimenti, da cui è emerso che i valori degli angoli di contatto delle valli, che sono più idrofobe, è superiore a quelli delle protuberanze; tuttavia questa differenza non può essere giustificata da una differenza nel rivestimento della superficie, poiché le valli e le protuberanze sono entrambe ricoperte di cera. L'unica differenza è che la superficie della protuberanza è liscia, mentre la superficie della valle presenta una struttura

esagonale di  $6\mu\text{m}$  di periodo. Questa struttura da un lato favorisce la nucleazione, dall'altro spinge la linea di contatto delle gocce, determinando un aumento dell'isteresi dell'angolo di contatto e una forma irregolare delle gocce. Gli effetti del patterning esagonale a questa scala spaziale sono quindi simili a quelli dell'abbassamento dell'angolo di contatto dell'acqua su una superficie liscia.

Per verificare la presenza di effetti termici differenziali tra valli e protuberanze, è stato invertito il gradiente di temperatura tra la regione più bassa della valle e la parte più alta della protuberanza. Per ottenere questo risultato, è stata abbassata la temperatura del substrato a  $1^{\circ}\text{C}$  e al contempo è stata convogliata aria secca ( $23^{\circ}\text{C}$ ) per evitare la condensazione dell'acqua. Successivamente è stata aumentata repentinamente la temperatura del substrato a circa  $11^{\circ}\text{C}$ . Al contempo è stata trasmessa aria umida alla stessa temperatura. La temperatura della superficie della valle era quindi maggiore della temperatura della cima. Nonostante ciò, l'esperimento ha dimostrato che il vapore acqueo inizia a condensare prima nelle valli. Questo è in

accordo con l'angolo di contatto più ampio nella posizione della protuberanza, dove la nucleazione richiede una supersaturazione maggiore rispetto alle valli.

Lo studio in questione conferma le proprietà specifiche della pelle del coleottero riguardo alla condensazione dell'acqua di rugiada. L'elevata emissività IR delle elitre rivestite di cera garantisce un efficiente raffreddamento radiativo. La microstruttura esagonale della superficie delle elitre fornisce un numero maggiore di siti di nucleazione rispetto alle cime, la cui superficie a livello microscopico è liscia. Di conseguenza il fenomeno si verifica maggiormente sulle valli. A seguito dello studio è possibile affermare che la raccolta di rugiada è effettivamente possibile sulle elitre quando le condizioni esterne sono favorevoli: cielo sereno e umidità relativa superiore al 55%.

Tali conclusioni aprono la strada verso la progettazione di un dispositivo in grado, non solo di ricavare acqua dalla nebbia, evento meno frequente durante l'anno, ma anche dalla rugiada, più costante (Guadarrama-Cetina, et al., 2014).

## 3.6 Brief

Quanto emerso dall'analisi di scenario ha condotto alla progettazione di un dispositivo in grado di sfruttare, nelle opportune condizioni, le capacità di condensazione dell'umidità dei materiali ad alta emissività IR per immagazzinare acqua dolce proveniente da una fonte alternativa a quelle tradizionali. Si rivela dunque necessario predisporre anche un recipiente che conservi l'acqua fino al momento del bisogno. Tale prodotto è stato pensato per un ambiente esterno parimenti privato e pubblico. A tal proposito è stata condotta una ricerca degli attuali dispositivi presenti oggi sul mercato con funzioni similari.

### 3.6.1 Stato dell'arte – dispositivi per la raccolta di nebbia e rugiada

I casi studio qui riportati sono stati analizzati in base ai materiali di cui sono composti, alla tipologia di processo attraverso cui sono in grado di reperire acqua, se attivo, quindi con apporto di energia, o passivo, e alla quantità d'acqua che sono in grado di accumulare giornalmente in condizioni favorevoli. Nella maggior parte dei casi il funzionamento è fortemente influenzato dalle condizioni giornaliere, quindi la resa è scostante.



34. Warka Tower, da warkawater.org

### Warka Tower

Progettista: Arturo Vittori

Anno e luogo di progettazione o produzione: Italia, 2012

Materiale: Bambù, poliestere, tessuto

Descrizione: La rete in poliestere per condensazione e impattamento raccoglie l'acqua della rugiada, della pioggia

e della nebbia. Le gocce scorrono lungo le fibre finché giungono nel serbatoio d'acqua. Nel corso degli anni sono state realizzate diverse versioni della Warka Tower che variano a seconda del luogo e delle condizioni d'uso. In circostanze favorevoli è in grado di raccogliere fino a 80 litri d'acqua al giorno e può essere eretta in 24h con il lavoro di sei persone (Warka Water, 2022). Presenta numerosi pregi in quanto usa materiali locali, è in grado di raccogliere sia l'acqua piovana sia la rugiada sia la nebbia, è facilmente manutenibile, poiché non necessita di personale esperto e funziona con un processo passivo, che non richiede perciò apporto di energia. Non si può inoltre ignorare il valore culturale del progetto, che si integra perfettamente con il paesaggio in cui è inserito ed è basato sulle tradizioni delle popolazioni per cui è stato concepito. Il nome stesso si rifà al tradizionale albero che, fonte di riparo dalla calura, rappresenta un punto di ritrovo della comunità.

Le criticità del progetto, invece, sono dovute all'uso, seppur in minima parte, di materiale plastico, all'esposizione all'aria aperta dell'acqua raccolta e alla deperibilità dei materiali organici usati, che richiedono maggiore manutenzione nel tempo.



35. Seas, da seas-sa.com

## Seas

Progettista o azienda produttrice: SEAS

Anno e luogo di progettazione o produzione: Svizzera 2015

Descrizione: Seas combina diverse tecnologie volte alla condensazione, depurazione e demineralizzazione dell'acqua. Rispetto alle altre tecnologie è in grado di reperirne una quantità ben maggiore, tra i 250 e i 10.000 litri al giorno, che gli consente una gamma di applicazioni più ampia, comprendendo anche l'agricoltura. Per funzionare necessita di energia elettrica, reperibile attraverso pannelli fotovoltaici, impianti eolici o pirogassificazione (SEAS, 2020). A suo favore volgono la considerevole capacità di condensazione e la sua versatilità. Infatti può fungere da deumidificatore, termostato, o

condizionatore d'aria, oltre a mettere a disposizione acqua depurata e demineralizzata. D'altra parte, però, il processo è attivo e la sua manutenzione richiede l'intervento di esperti, data la complessità del sistema.



36. Roots Up, da [rootsupsolutions.org](http://rootsupsolutions.org)

## Roots Up

Progettista o azienda produttrice: Ricercatori in Etiopia  
Anno e luogo di progettazione o produzione: Etiopia, 2015  
Materiale: Bambù, policarbonato, bioplastica, corde  
Descrizione: Roots Up nasce dalla necessità di impedire nelle serre la formazione di muffe generate dalla condensazione dell'acqua. Durante il giorno le alte temperature fanno evaporare l'acqua creando un ambiente molto umido. Di notte viene aperto il tetto della tenda, consentendo all'aria fresca di entrare. In questo modo

si raggiunge il punto di rugiada e l'acqua condensa.

Anche in questo caso si tratta di un processo passivo. Il dispositivo è di facile manutenibilità e può essere aggiunto a serre già esistenti (RootsUp, 2020). Di contro, però, il funzionamento è solo notturno, di giorno l'ambiente lavorativo è molto umido e per dare inizio al processo è necessario un quantitativo iniziale d'acqua.



37. Groasis Waterboxx, da [groasis.com](http://groasis.com)

## Groasis Waterboxx

Progettista o azienda produttrice: Pieter Hoff  
Anno e luogo di progettazione o produzione: Olanda, 2010,  
Materiale: Polipropilene  
Descrizione: Groasis Waterboxx nasce come incubatore di

piante in zone aride del pianeta nelle prime fasi della loro vita. Si ispira alla funzione svolta dagli escrementi degli uccelli nella protezione del seme dal calore. Durante la notte la superficie in polipropilene della scatola, grazie a una piastra isolante, si raffredda più velocemente dell'aria circostante, creando condensa che scivola verso il foro al centro, incanalando l'acqua all'interno del contenitore (Groasis, 2010). Anche in questo caso il processo è passivo e il prodotto è monomaterico, seppur polimerico. La maggiore criticità deriva dal funzionamento limitato alle ore notturne.



38. Fog Quest, da fogquest.org

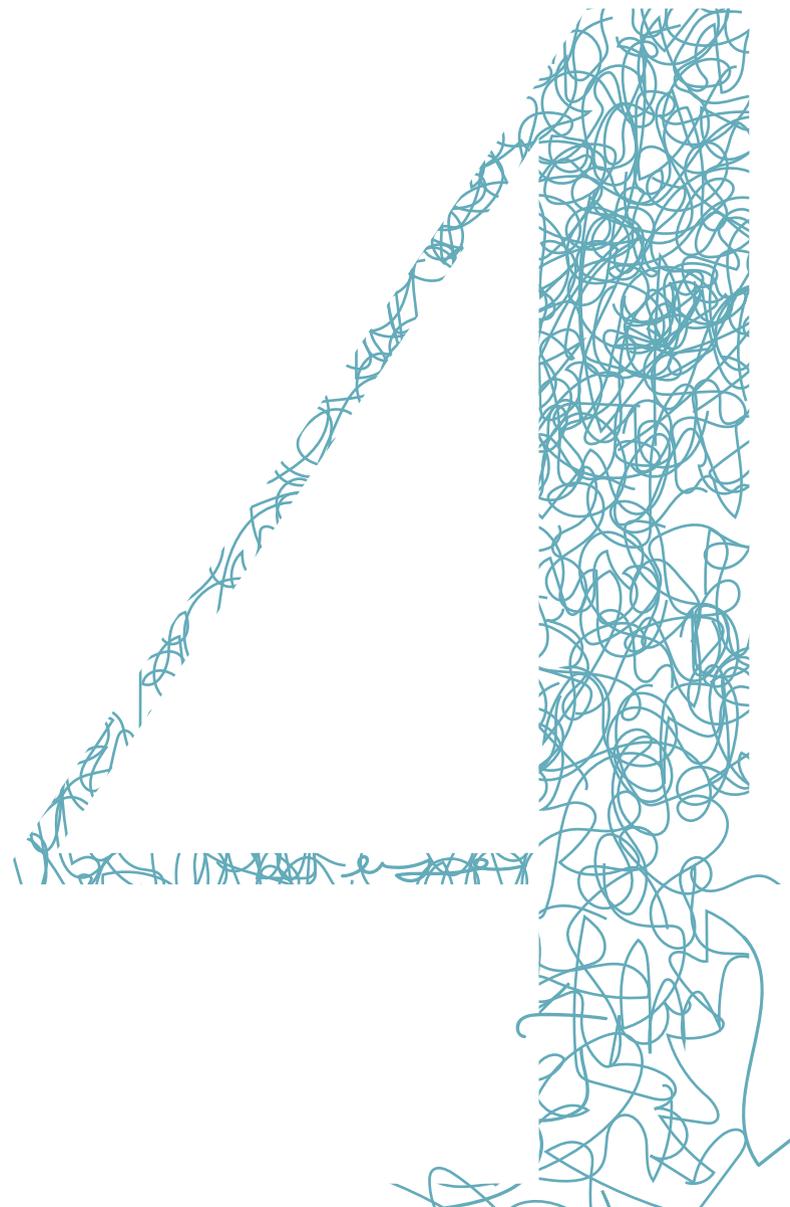
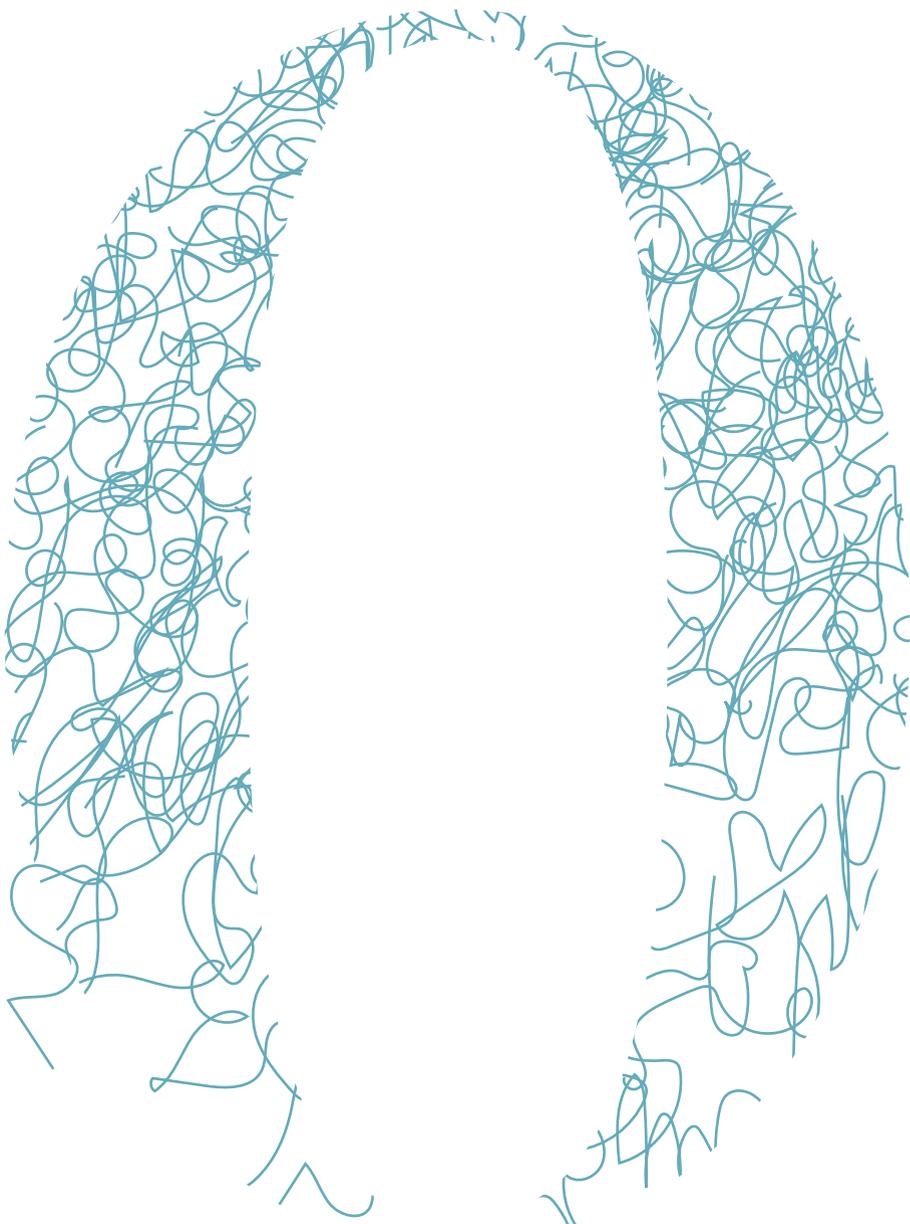
## Fog Quest

Progettista o azienda produttrice: Fog Quest

Anno e luogo di progettazione o produzione: Canada, 2017

Materiale: polietilene o polipropilene

Descrizione: La rete in poliestere per condensazione e impattamento raccoglie l'acqua della rugiada, della pioggia e delle nebbie (FogQuest, 2020). La soluzione non richiede energia, ed è monomaterica; tuttavia il funzionamento è limitato alle sole aree fortemente nebbiose e la necessità di una struttura a rete, indispensabile per passaggio del vento, riduce l'efficienza di raccolta al 60%.



**PROGETTO**

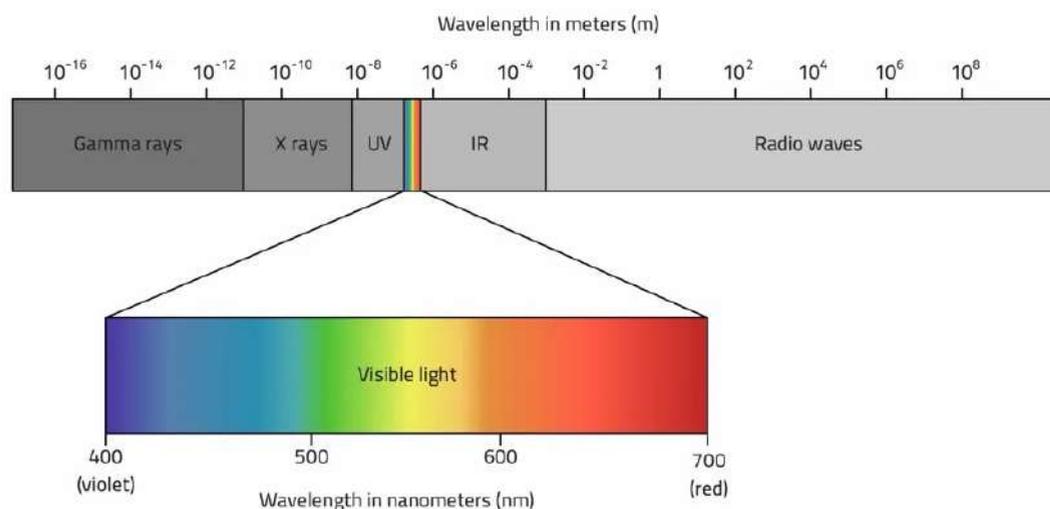


## 4.1 Selezione del materiale ad alta emissività IR

Le ricerche relative ai materiali ad alto raffreddamento radiativo sono tutt'ora in corso. La realizzazione di materiali in grado di mantenere un sufficiente  $\Delta T$  di temperatura da indurre alla condensazione l'umidità per 24h rappresenta una sfida non ancora del tutto vinta. Le maggiori problematiche risiedono nella complessità di alcuni processi, che poco si prestano a un uso industriale, e nell'uso di materiali con scarsa disponibilità in natura e per questo a elevato rischio esaurimento, o materiali la cui produzione potrebbe essere causa di problematiche ambientali. Queste sono tutte problematiche che riflettono il discorso relativo ai limiti dell'approccio biomimetico e che confermano l'attuale difficoltà delle tecnologie e dei materiali a disposizione nel riprodurre processi e materiali naturali. Ciononostante esistono materiali in possesso dei requisiti richiesti, il cui impatto è minore rispetto ad altre opzioni. Nell'articolo *Beyond the Visible: Bioinspired Infrared Adaptive Materials* vengono esplorati i materiali adattativi infrarossi bioispirati attualmente disponibili. Sono molti in natura gli organismi viventi che sono in grado di

manipolare attivamente le proprie radiazioni IR, nonché di percepire quelle esterne a scopo di comunicazione, rilevamento, mimetizzazione, gestione termica e altro ancora. Ad esempio, i serpenti a sonagli e i pipistrelli vampiro hanno la capacità di percepire le radiazioni IR degli oggetti, in modo da poter continuare a cercare cibo nell'oscurità della notte. I cefalopodi mostrano capacità di mimetizzazione notevoli grazie all'adattamento autonomo dei colori nell'intera regione visibile e infrarossa, mentre le formiche argentate del Sahara sono in grado di mantenersi fresche in condizioni di caldo estremo grazie a una riflessione superiore della luce solare e a un potenziamento della radiazione termica nella regione dell'IR medio. I coleotteri del fuoco sono in grado di localizzare gli incendi boschivi grazie ai loro organi di rilevamento dell'IR, cosicché possano deporre le uova nel legno appena bruciato.

Le radiazioni IR, talvolta chiamate luce IR, sono un segmento dello spettro elettromagnetico, scoperta per



39. Spettro elettromagnetico, da radio2space.com

la prima volta da William Herschel 200 anni fa, definite da una lunghezza d'onda compresa fra 0,76 e 1000  $\mu\text{m}$ . All'interno dello spettro elettromagnetico, costituito, in ordine di lunghezza d'onda dalla più bassa alla più alta, da raggi gamma, raggi X, luce ultravioletta (UV), luce visibile, IR, microonde e onde radio, la regione spettrale IR si presenta a frequenze appena inferiori a quelle della luce rossa visibile, da cui il nome "infrarossi". In generale, le onde IR sono suddivise in cinque sezioni: IR vicino (NIR, 0,76-1,5  $\mu\text{m}$ ), IR a breve lunghezza d'onda (SWIR) (1,5-3  $\mu\text{m}$ ), IR a media lunghezza d'onda (MWIR) (3-8  $\mu\text{m}$ ), IR a lunga lunghezza d'onda (LWIR) (8-15  $\mu\text{m}$ ) e IR lontano (FIR) (15-1000  $\mu\text{m}$ ).

Le interazioni tra luce IR e materiali adattivi possono offrire sbocchi progettuali principalmente in due aspetti: da un lato, il controllo e la modulazione delle radiazioni IR, dall'altro la luce IR remota potrebbe essere utilizzata per controllare le strutture e le funzionalità dei materiali adattivi dai livelli molecolari a quelli sovramolecolari e macroscopici. In questa sede verrà approfondita solo la

prima delle due potenzialità.

Quando le radiazioni, in particolare l'IR, colpiscono una superficie, l'interazione onda elettromagnetica-materiale può dare vita a quattro fenomeni possibili: assorbimento, riflessione, emissione e trasmissione. Questi comportamenti negli esseri viventi, a seconda della specie, possono essere usati per regolare la temperatura corporea, per mimetizzarsi, oppure per rilevare corpi solidi, da schivare o da predare. In questo caso è di particolare interesse la prima applicazione, ovvero la termoregolazione, possibile grazie al fenomeno di raffreddamento radiativo IR, che consiste in una forma di raffreddamento ecologica passiva, poiché non richiede un apporto di energia. Le indagini sistematiche sul raffreddamento radiativo IR sono iniziate negli anni '60 utilizzando materiali convenzionali per questo scopo, come l'alluminio rivestito di  $\text{SiO}_2$ , o di polivinilcloruro. Recentemente, è stato dimostrato un rinnovato interesse nel campo grazie ai notevoli progressi nello sviluppo della nanoscienza avanzata e della tecnologia di nano fabbricazione.

Il raffreddamento radiativo IR nelle ore notturne può essere facilmente realizzato con materiali funzionali avanzati con emissività elevata a banda larga nella gamma IR. A questo scopo, sono stati ampiamente studiati numerosi materiali e sistemi, come i materiali di raffreddamento radiativo IR a base di polimeri, i materiali di rivestimento inorganici e i gas che emettono selettivamente IR. Tuttavia, lo sviluppo di materiali funzionali avanzati per il raffreddamento radiativo IR di giorno è un compito molto più impegnativo, a causa dei requisiti rigorosi che i materiali devono possedere contemporaneamente: un'alta riflettività nello spettro solare e un'alta emissività nella finestra di trasparenza IR. Di seguito si riportano le principali proposte ad oggi esistenti di materiali a raffreddamento radiativo IR di ispirazione biomimetica, le cui caratteristiche principali sono descritte nell'articolo *Beyond the Visible: Bioinspired Infrared Adaptive Materials* (Yang, et al., 2021). Raman et al. hanno sviluppato un dispositivo termico fotonico integrato per il raffreddamento radiativo IR diurno, costituito da HfO<sub>2</sub> e SiO<sub>2</sub> multistrato con uno spessore ben progettato su un substrato rivestito d'argento. I tre strati superiori di HfO<sub>2</sub> e SiO<sub>2</sub> sono molto più spessi per la radiazione termica selettiva, mentre i quattro strati inferiori sono più sottili e progettati per la riflessione solare. Di conseguenza, questa nanostruttura fotonica ha un'ottima emissività nella finestra di trasparenza IR e può riflettere quasi il 97% della radiazione solare. Anche molte altre strutture nanofotoniche hanno mostrato una riflessione

solare superiore e un'elevata emissività nella finestra di trasparenza IR (Yang, et al., 2021). Grazie al loro lavoro, in cui viene dimostrato il raffreddamento radiativo di un oggetto di 5 °C al di sotto della temperatura ambiente sotto la luce diretta del sole, lo studio del raffreddamento radiativo ha acquisito nuovo interesse in ambito accademico (Atiganyanun, et al., 2018).

Rephaeli et al. hanno proposto un sistema di raffreddamento radiativo IR diurno, progettando un riflettore di luce solare e una struttura nanofotonica a due strati, in grado di emettere selettivamente radiazioni termiche nella finestra di trasparenza IR.

Hossain et al. hanno proposto un emettitore termico IR con array di pilastri di metamateriale conico multistrato, dove ogni pilastro era composto da strati alternati di germanio e alluminio; la nanostruttura fotonica risultante ha mostrato una bassa emissività al di fuori della finestra di trasparenza IR e un'elevata emissività nella finestra di trasparenza IR. Zou et al. hanno progettato una metasuperficie di risonatore dielettrico con argento e silicio di tipo n drogato con fosforo per il raffreddamento radiativo IR diurno. La misurazione dell'emissività spettrale ha indicato un'elevata emissione nella finestra di trasparenza IR e questo design unico potrebbe essere facilmente integrato con piattaforme fotoniche in silicio per la manipolazione della radiazione IR. Vale la pena notare che queste nanostrutture funzionali potrebbero essere fabbricate su larga scala utilizzando la

fotolitografia UV o la litografia nanoimprint.

Le tecnologie indossabili con caratteristiche di raffreddamento radiativo IR diurno sono molto richieste per le loro interessanti proprietà, come la flessibilità, l'adattabilità, la permeabilità, la biocompatibilità, la modellabilità, la processabilità e la scalabilità. A tal fine, sono già stati proposti molti approcci promettenti, come l'incorporazione di nanoparticelle in una matrice per formare un rivestimento, un rivestimento funzionale a uno o due strati, e metamateriali ibridi a base di polimeri.

Atigyanun et al. hanno sviluppato un rivestimento di microsferi casuali per il raffreddamento radiativo IR diurno. Rispetto alla vernice bianca riflettente solare disponibile in commercio, i rivestimenti di microsferi, che possono essere fabbricati con metodi scalabili e semplici, sono stati in grado di ridurre la temperatura del substrato di 4,7 °C durante il giorno in condizioni di forte luce solare. Va notato che le proprietà ottiche dei rivestimenti di microsferi risultanti possono essere controllate separatamente a diverse lunghezze d'onda, ad esempio attraverso la diffusione nell'intervallo visibile e la radiazione termica nel medio infrarosso (Yang, et al., 2021).

Riguardo alle opzioni testate citate, per ridurre l'assorbimento della luce solare, si possono utilizzare sofisticate nanostrutture ad alta precisione, oppure una sottile pellicola metallica, come l'argento, capace di mantenere l'assorbenza solare al di sotto del 4%. Sarebbe auspicabile

trovare un metallo con caratteristiche simili, ma meno gravoso in termini economici e ambientali, se non fosse che, nonostante anche altre pellicole metalliche possano riflettere la luce solare, la maggior parte dei metalli assorbe di più dell'argento. Ne consegue che, con un aumento di appena l'1%, le prestazioni di raffreddamento degradano significativamente. Sulla base di questa considerazione, studi recenti hanno utilizzato una pellicola d'argento in combinazione con materiali dielettrici ad alta riflettanza solare per ottenere un raffreddamento radiativo efficiente sotto la luce del sole. In alcuni di questi studi, i materiali di raffreddamento si presentano sotto forma di un sottile foglio flessibile, dove l'argento è il materiale principalmente responsabile della riflessione solare. Sebbene gli studi precedenti, che hanno utilizzato l'argento, abbiano mostrato grandi promesse nel raffreddamento radiativo, sarebbe auspicabile per le applicazioni pratiche eliminare l'uso di pellicole metalliche così costose e i relativi processi di deposizione, e avere i materiali disponibili in un formato molto più semplice come la vernice. A tal proposito Atigyanun et al. propongono una soluzione in vernice che usa microsferi in silice. Rispetto a soluzioni simili ma in forma di film solido di SiO<sub>2</sub>, nel caso della vernice i supporti porosi forniscono una migliore corrispondenza di impedenza ottica con l'aria, aumentando l'emissività dei supporti casuali. La soluzione di Atigyanun et al. prevede che la radiazione solare venga dispersa dal rivestimento di microsferi senza essere assorbita, mentre il calore

fuoriesce dalla superficie tramite emissione a medio IR. (Atiganyanun, et al., 2018)

I risultati dei test effettuati mostrano che il rivestimento a base di microsferi su un substrato nero, senza l'uso di costosi rivestimenti d'argento, può ridurre la temperatura del substrato al di sotto di quella ambientale di ben 12 °C sotto la luce del sole.

A seguito di una consultazione, il rivestimento con microsferi di silice è stato ritenuto il più idoneo per il progetto, considerando le sue capacità, la maggiore reperibilità e il minor impatto sull'ambiente rispetto alle altre opzioni. Si premette che la scelta di questa soluzione non è stata supportata da prove in laboratorio e, se contestualizzata al progetto, presenta delle possibili problematiche che andrebbero testate ed eventualmente risolte. I metodi di applicazione più idonei potrebbero essere la vernice, depositata su base polimerica, oppure su tessuto idrofobico tramite il processo di spray coating.

Per quanto concerne l'alternanza di zone idrofiliche e idrofobiche a cui il progetto in parte si ispira, bisogna considerare ulteriori fattori, in quanto le sfere di silice possono presentare queste caratteristiche, variando i precursori a partire dai quali esse vengono sintetizzate, oppure in base a modifiche successive della loro superficie; tuttavia senza ulteriori prove non è possibile determinare se questa soluzione possa compromettere la formazione di un ricoprimento stabile. Una seconda soluzione, considerando la dimensione abbastanza grande, intorno ai 200 micron, delle protuberanze idrofiliche sulle elitre dell'insetto, è quella di provare a realizzare un pattern usando una stampante 3D. Bisogna comunque considerare che al fine del progetto, come dimostrato da Guadarrama-Cetina, et al., 2014, il fenomeno di nucleazione sulle elitre si verifica soprattutto sulle zone idrofobiche delle elitre. Di conseguenza questa alternanza potrebbe non essere necessaria, bensì preferibile.

## 4.2 Tabella esigenziale

Esigenze	Requisiti	Prestazioni
Favorire la condensazione dell'acqua	In condizioni favorevoli, la superficie deve mantenere un $\Delta T$ di temperatura tale da favorire il raggiungimento del punto di rugiada	Tessuto idrorepellente Rivestimento in microsferiche di silice
Immagazzinare acqua	L'acqua condensata deve essere incanalata e raccolta in un recipiente	Contenitore a forma sferica dal diametro di 30 cm
Essere adatto a giardini di differenti dimensioni	Il prodotto deve svilupparsi prevalentemente in altezza e soddisfare il fabbisogno di una determinata dimensione di giardino	Il progetto è stato sviluppato nelle seguenti dimensioni: 740x1100x850 mm  Il progetto può essere prodotto in scale differenti a seconda del bisogno. Tuttavia sarebbero necessarie verifiche strutturali
Consentire all'acqua di irrigare	L'acqua immagazzinata deve essere accessibile per l'irrigazione	Sfruttare la gravità per favorire la fuoriuscita dell'acqua  Predisporre una valvola a sfera, a cui può essere avvitato un tubo in gomma per regolare il flusso

## Esigenze

## Requisiti

## Prestazioni

Impedire l'evaporazione dell'acqua

Il recipiente deve essere protetto dai raggi solari

La struttura di base e le eventuali piante rampicanti ombreggiano il recipiente

Il recipiente deve essere realizzato in un materiale con un buon isolamento termico

Il recipiente è realizzato in PLA

Il foro di entrata dell'acqua deve avere dimensioni modeste

Foro di diametro 10 cm

Evitare il contatto tra l'acqua e i componenti elettrici

Il circuito elettrico deve essere isolato

Percorso dei cavi elettrici guidato dai tubolari metallici Vedi pag.91

Troppopieno che impedisce all'acqua in eccesso di entrare in contatto con i cavi elettrici Vedi pag.91

Produrre energia senza l'uso di corrente elettrica

Utilizzo di fonti rinnovabili per la generazione di energia

Uso di pannelli fotovoltaici collegati a una batteria

Il prodotto deve essere facilmente assemblabile e manutenibile

Evitare l'uso di giunzioni irreversibili

Tutti i componenti sono uniti fra loro tramite giunti per gravità e opposizione  
Vedi storyboard pag. 90

Illuminare il giardino durante le ore notturne

Integrare nella struttura dispositivi di illuminazione

Uso di strisce a LED, alimentate da un sistema a pannelli fotovoltaici



## 4.3 Presentazione: componenti, materiali, interazioni, storyboard

Lo scopo del progetto è di fornire una soluzione alternativa alle fonti d'acqua dolce tradizionali per l'irrigazione di orti e piante. A tale scopo è stato usato l'approccio biomimetico per ricercare nella natura processi passivi di condensazione dell'acqua. Poiché il progetto si inserisce all'interno di parchi privati o pubblici, per ottimizzare gli spazi, la soluzione integra due funzioni nello stesso progetto: da un lato la raccolta dell'acqua, dall'altra l'illuminazione tramite strisce a LED.

Il nome *Proskýnesis*, in greco antico προσκύνησις, significa "venerazione", "adorazione" e veniva usata in particolare riferimento alla pratica persiana di rendere omaggio a una persona di rango più elevato tramite genuflessioni o prostrazioni. La stessa posizione viene assunta dall'insetto che ha ispirato il progetto, il quale, per indurre alla condensazione l'umidità, alza l'addome in una posa che ricorda proprio quella di venerazione.

Nonostante per questa tesi venga presentato un prodotto con uno spazio d'ingombro di 740x1100x850 mm, la struttura

si presta anche a scale maggiori, affinché la capacità di raccolta possa aumentare considerevolmente e, di conseguenza, offrire un beneficio maggiore nel soddisfare il fabbisogno richiesto, soprattutto se inserito in parchi pubblici. In questa sede mancano le verifiche di resistenza strutturale necessarie a determinare la stabilità del progetto qualora venga prodotto in dimensioni superiori.

La base del progetto è realizzata in acido polilattico (PLA) opaco tramite stampaggio rotazionale. Allo stesso modo il recipiente a sfera in PLA è ottenuto grazie a uno stampaggio rotazionale a doppia figura, in quanto la forma consente in questo caso di separare i due componenti all'altezza del foro superiore. Per la sfera, il PLA è semitrasparente in modo tale da lasciar intravedere il livello dell'acqua. Dal lato opposto, invece, viene avvitata una valvola a sfera, realizzata in acciaio e PLA, che regola la fuoriuscita dell'acqua. Proseguendo verso l'alto la struttura che mantiene in tensione il tessuto è prodotta attraverso un processo di estrusione dell'alluminio, seguito

da calandratura. Grazie alla rastrematura i componenti si incastrano tra di loro senza necessità di viti.

Il tessuto idrorepellente favorisce la formazione di goccioline che, grazie alla superficie inclinata, vengono indirizzate verso il contenitore.

Al centro è posta una struttura verticale in alluminio che ospita l'impianto elettrico, la batteria e il pannello fotovoltaico, elementi necessari all'illuminazione notturna. Tutti i componenti sono assemblati fra loro usando giunti per gravità e opposizione.

Dal momento che si intendeva rendere il progetto indipendente dall'energia elettrica, è stato necessario trovare un modo per avere accesso all'acqua senza l'uso di pompe idrauliche. Si è ritenuto che la soluzione più conveniente fosse sfruttare la forza di gravità e, per tale

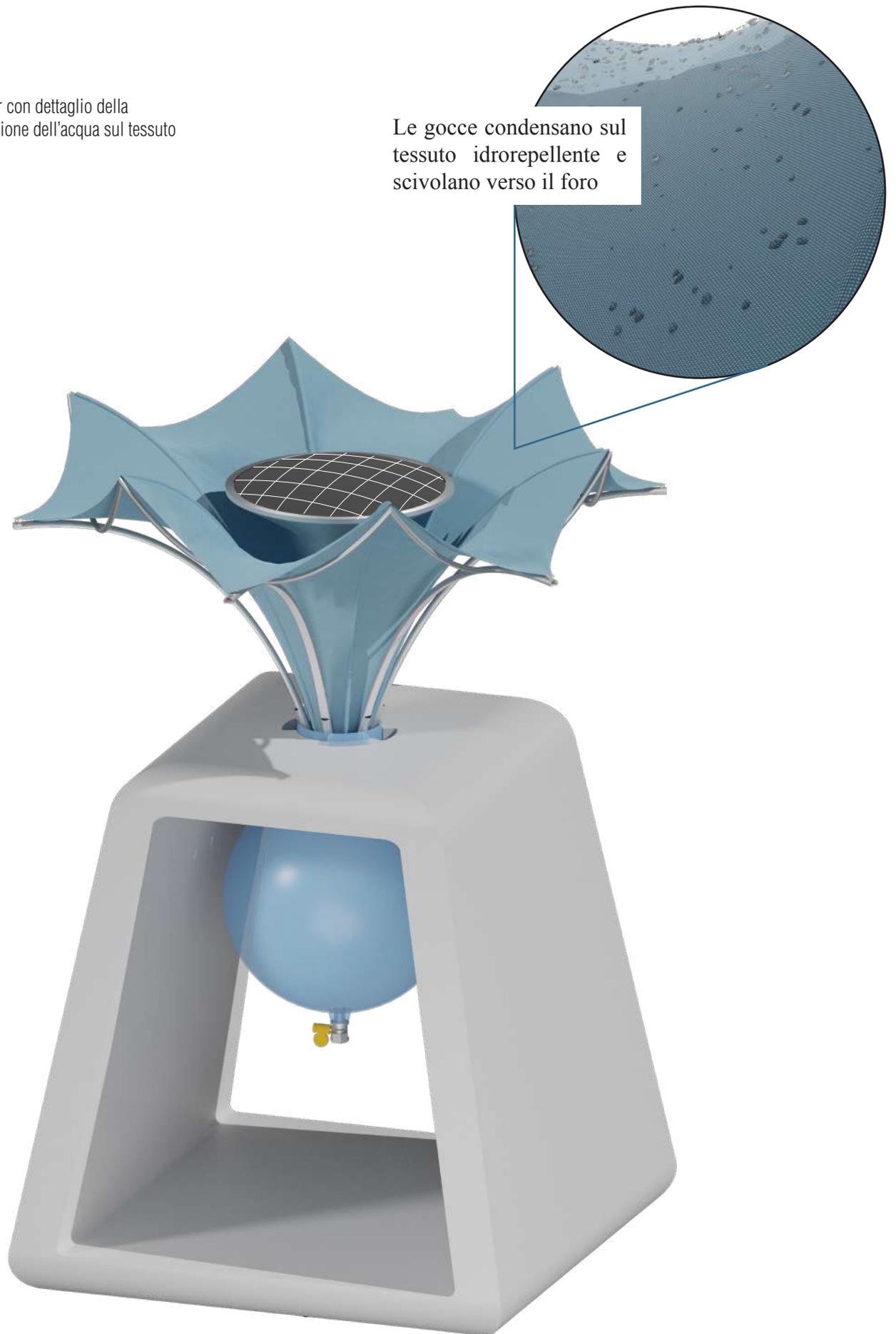
ragione, il contenitore dell'acqua è sopraelevato rispetto al livello del terreno. Anche la forma sferica favorisce il convogliamento dell'acqua verso la valvola.

La struttura a tronco di piramide a base quadrata è pensata anche per consentire alle piante rampicanti di crescervi intorno, integrando così il prodotto all'ambiente in cui è inserito. Inoltre la struttura in sé, eventualmente arricchita della vegetazione rampicante, funge da protezione contro i raggi solari che possono favorire l'evaporazione dell'acqua.

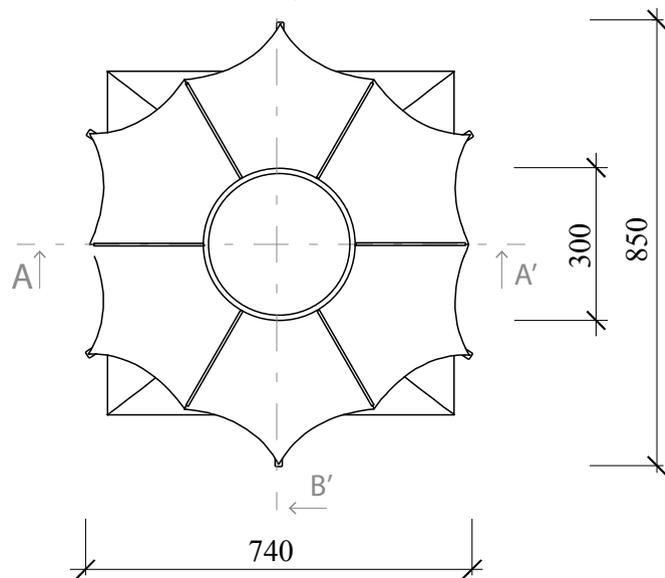
Date le condizioni particolari di funzionamento si consiglia di posizionare il dispositivo in aree umide, come i prati, e in penombra. Eventualmente si può anche fare una valutazione delle aree ventose, evitando di posizionare il prodotto lungo il tragitto percorso da un vento caldo, che tenderebbe a deumidificare l'aria.

40. Render con dettaglio della  
condensazione dell'acqua sul tessuto

Le gocce condensano sul  
tessuto idrorepellente e  
scivolano verso il foro

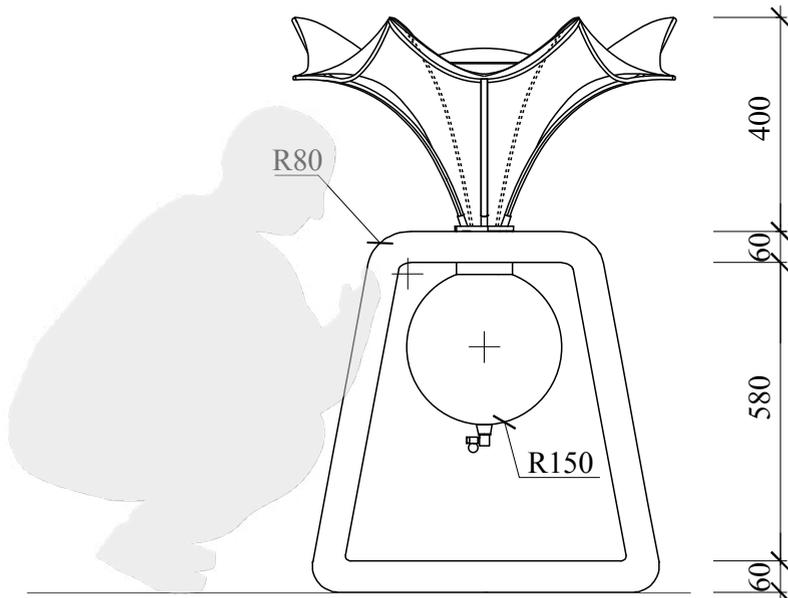


Vista superiore <sub>B</sub>

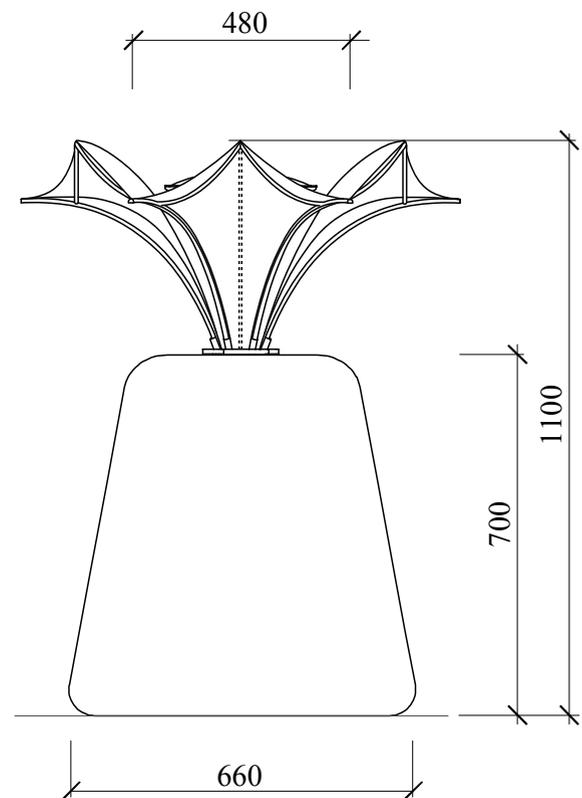


Quote in mm  
Scala metrica 1:20

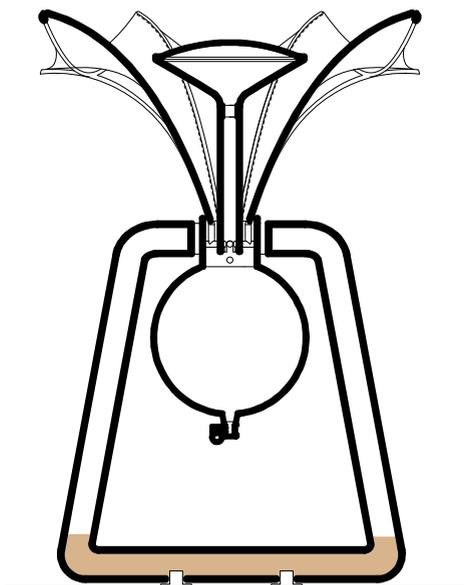
Vista frontale



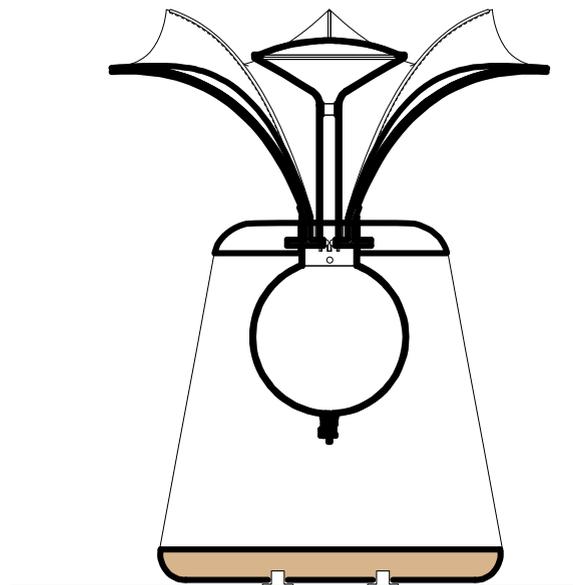
Vista laterale



### Sezione AA'



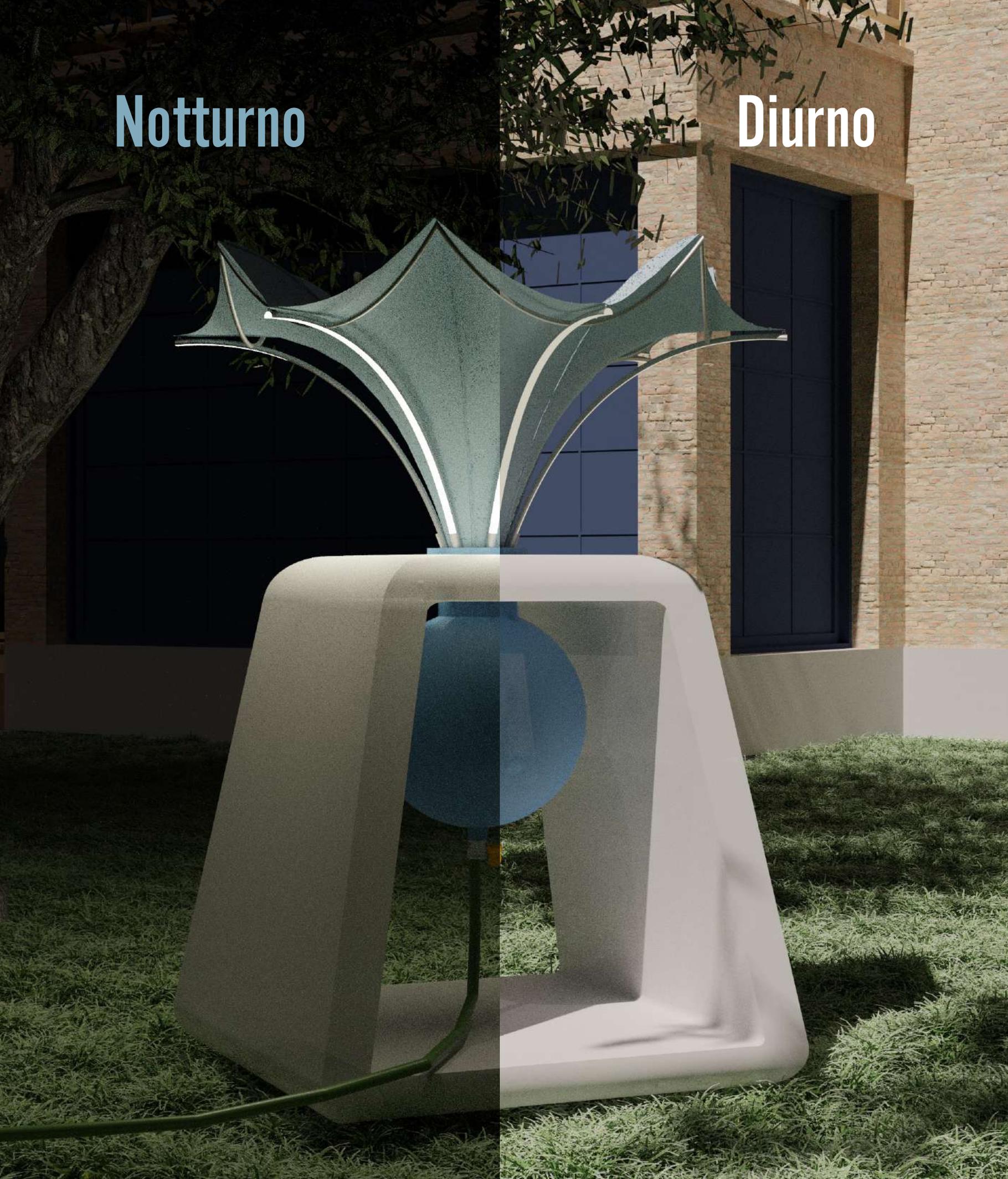
### Sezione BB'



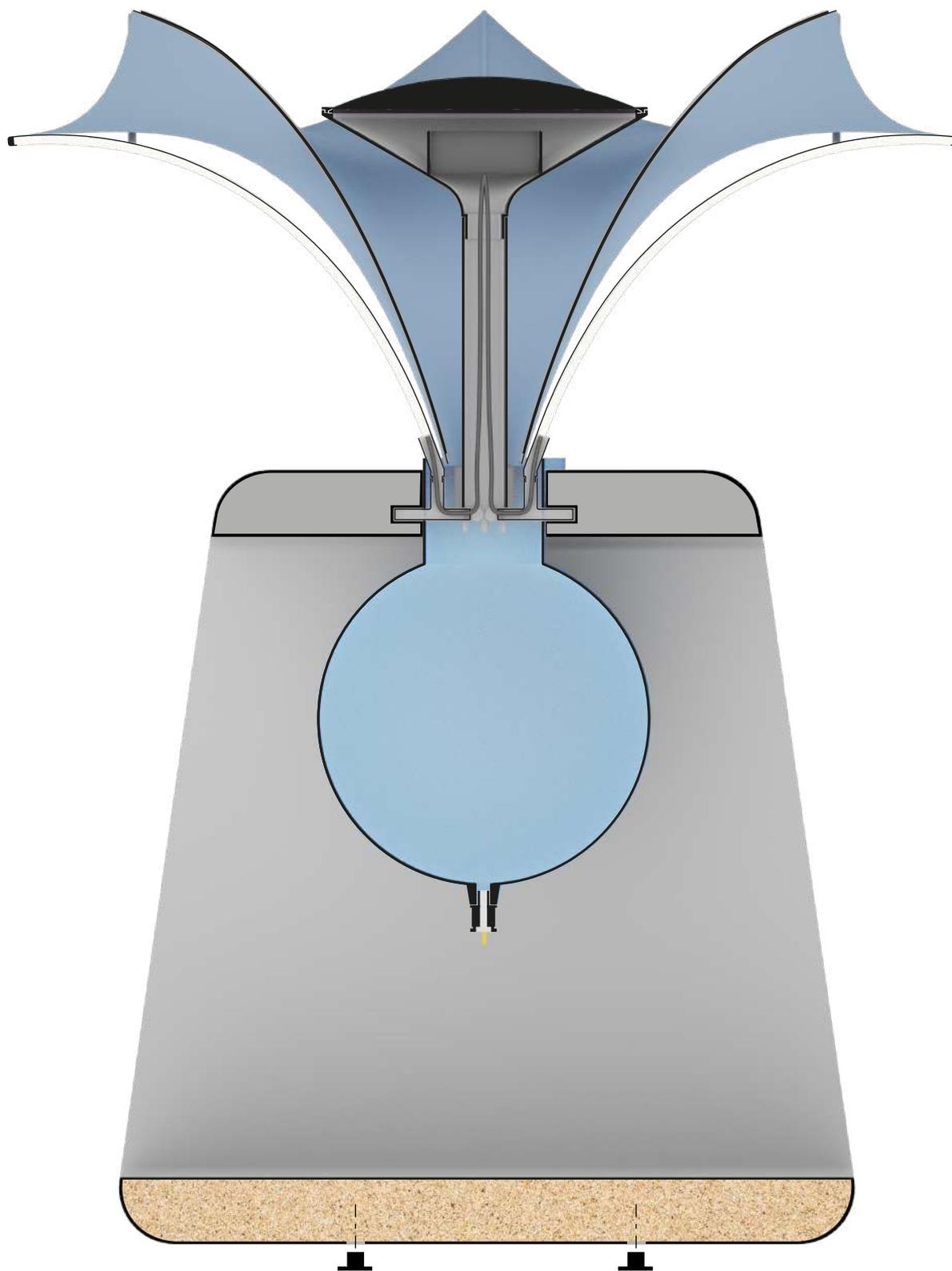
Quote in mm  
Scala metrica 1:20

Notturmo

Diurno



## Sezione BB' con sistema di stabilità



**Fori**  
La sabbia, che garantisce stabilità, viene inserita attraverso i fori. Questi ultimi vengono chiusi da tappi in silicone.

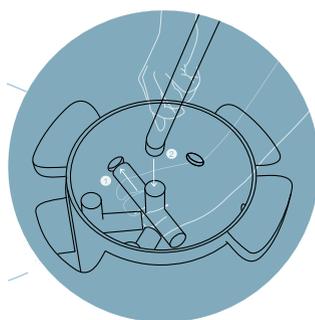
41. Immagine pagina sinistra: render ambientato notturno e diurno

42. Immagine pagina destra: sezione renderizzata con dettaglio soluzione per stabilità

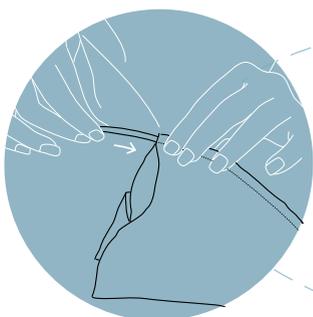
## Storyboard di montaggio e utilizzo



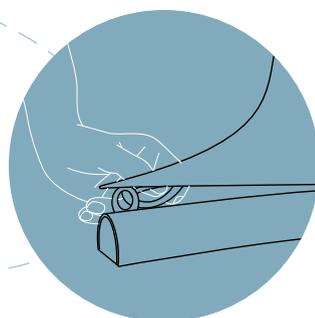
Inserire la sfera nel foro della base dal basso verso l'alto. Una volta fuoriuscita dall'altro lato, ruotare leggermente la sfera per impedire che cada.



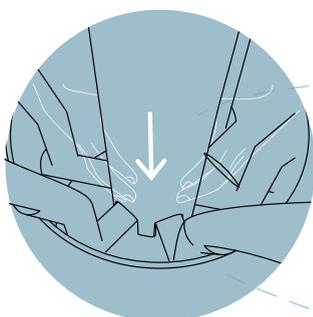
Inserire in corrispondenza dei fori i tubolari metallici a cui poi vengono incastrate le astine che fungono da guide per le strisce a LED.



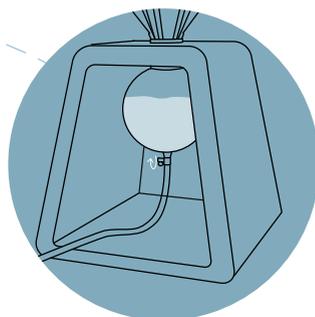
Inserire tutte le astine più sottili nelle cuciture del tessuto, in modo tale da conferire struttura.



Legare i nastri del tessuto agli anelli presenti sulle asti delle luci a LED.

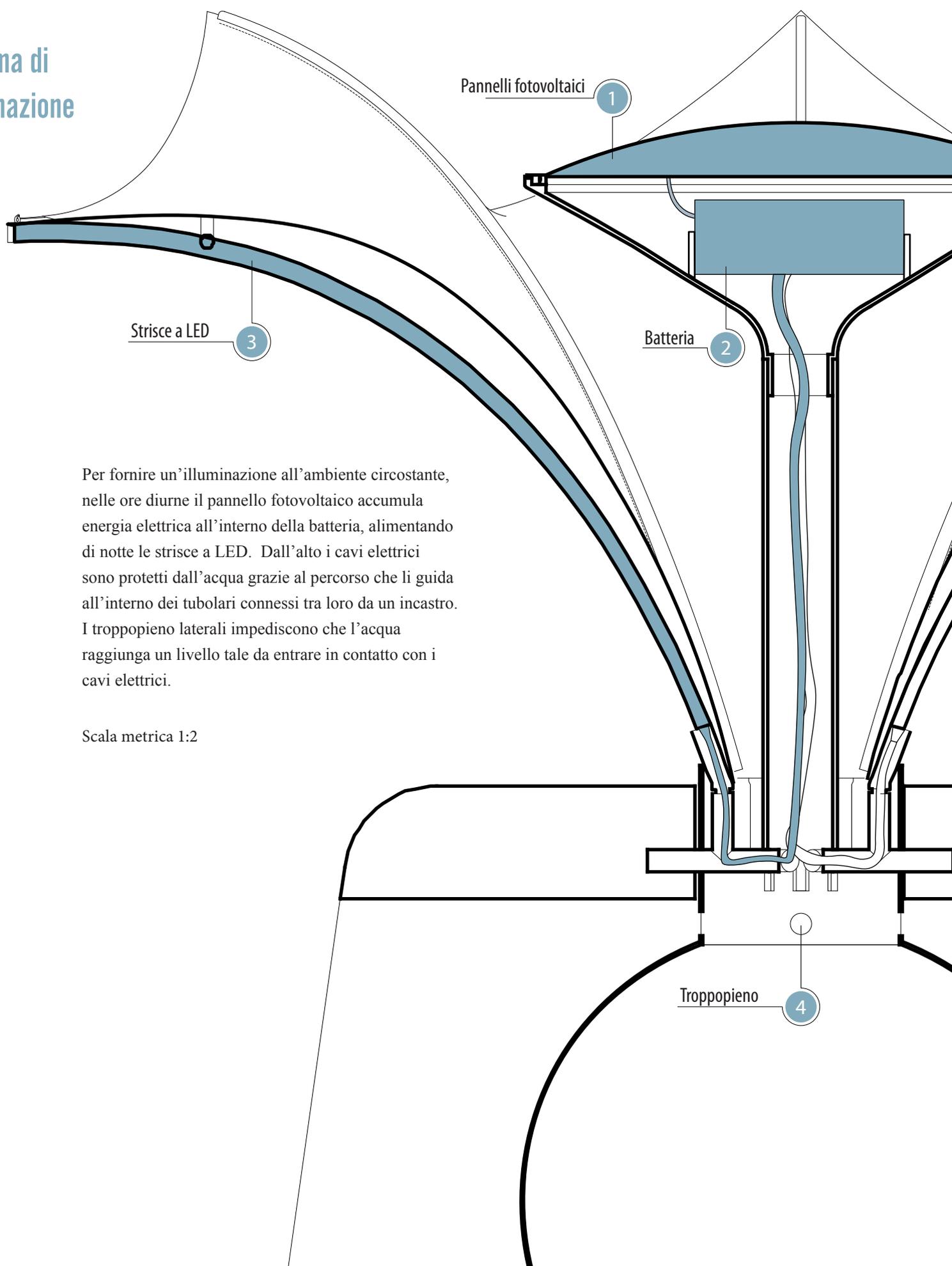


Incastrare per gravità il tubo del pannello fotovoltaico all'estremità interna dei tubolari.



Ruotare la valvola per consentire la fuoriuscita dell'acqua e irrigare. Alla valvola si può innestare un tubo di gomma oppure si può usare direttamente un annaffiatoio.

## Sistema di illuminazione



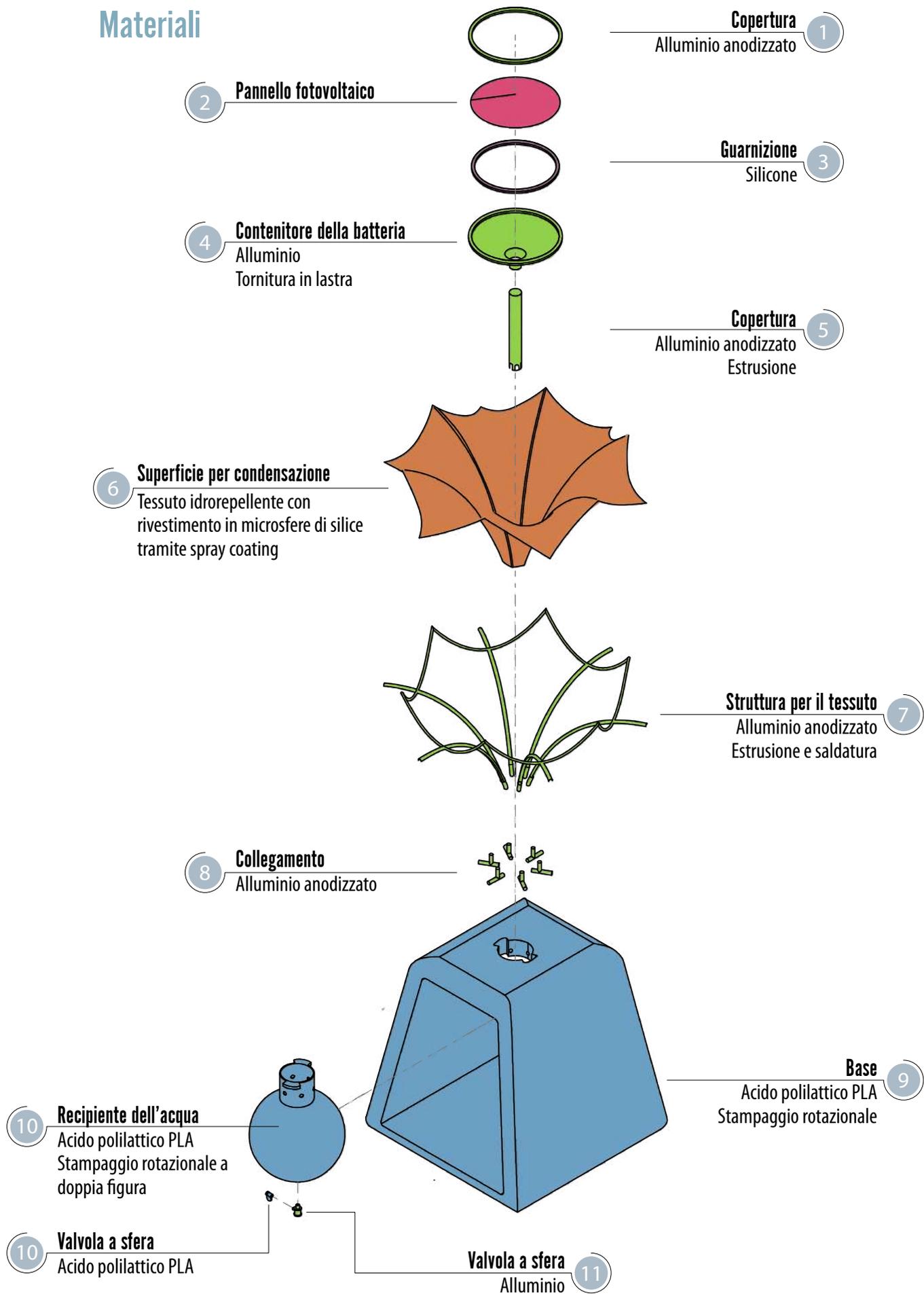
Per fornire un'illuminazione all'ambiente circostante, nelle ore diurne il pannello fotovoltaico accumula energia elettrica all'interno della batteria, alimentando di notte le strisce a LED. Dall'alto i cavi elettrici sono protetti dall'acqua grazie al percorso che li guida all'interno dei tubolari connessi tra loro da un incastro. I troppopieno laterali impediscono che l'acqua raggiunga un livello tale da entrare in contatto con i cavi elettrici.

Scala metrica 1:2

Troppopieno

4

## Materiali



# Esploso assonometrico



# Conclusioni

Il nostro tempo è segnato dal peso di una scelta non più rimandabile. Si può decidere di continuare a ignorare l'insostenibilità dell'attuale stile di vita, conducendo alla fine del mondo così come oggi è conosciuto, oppure fare un'inversione di rotta nel modo in cui le risorse a disposizione vengono utilizzate, dirigendosi verso uno stile di vita più sostenibile.

Si tratta di un bivio, la cui responsabilità ricade sull'attuale generazione.

A tale scopo la ricerca svolta ha confermato le potenzialità dell'approccio biomimetico in ambito progettuale, in quanto il mondo naturale, plasmato da un discernimento la cui genesi risale a milioni di anni fa, rappresenta un'inesauribile fonte di ispirazione per sfide progettuali. La varietà degli ecosistemi e degli organismi a disposizione offre inoltre un ventaglio di opzioni da cui attingere per la risoluzione di una problematica, dando al progettista l'opportunità di trovare la soluzione più adatta alle variabili che influenzano il progetto.

Si tratta di una disciplina ancora agli albori e con una diffusione ancora limitata, la cui applicazione si sta tuttavia intensificando negli ultimi anni. Lo dimostra anche l'analisi temporale dei casi studio relativi al design d'interni presenti nella tesi, che iniziando nel 2005, diventano sempre più frequenti nel corso dell'ultimo decennio.

Con il progetto Proskýnesis la biomimesi è messa al servizio della ricerca di un accesso alternativo all'acqua dolce rispetto alle fonti tradizionali, quali sorgenti, fiumi, laghi e falde acquifere. A tal proposito le capacità di adattamento a un ambiente inospitale come il deserto del Namib del coleottero delle nebbie si sono rivelate preziose, soprattutto considerando che la sua strategia non richiede un apporto di energia, bensì è un processo passivo. L'alta emissività IR delle sue elitre è stata il punto di partenza del progetto, la cui assenza della necessità di un apporto di energia per il funzionamento è sicuramente un pregio, sia in un'ottica di libertà di posizionamento del prodotto in uno spazio verde,

sia considerando il dispendio energetico e l'uso di risorse. Un ulteriore punto di forza è dato dalla sua bifunzionalità, ossia il sistema di illuminazione a LED integrato e alimentato da pannelli fotovoltaici, che perciò non vincolano il progetto alla presenza o assenza di un sistema elettrico a cui collegarsi.

Il clima italiano in generale presenta condizioni favorevoli a un buon funzionamento del dispositivo. Ciò non toglie che possa essere idoneo anche ai Paesi limitrofi e non solo. L'acqua che si ricava non è da considerare potabile, ma il suo uso in ambito botanico allevia l'acqua degli acquedotti di questa responsabilità, in virtù delle gravi problematiche dovute alla siccità a cui si sta andando incontro di anno in anno.

Sebbene in questo caso sia stata riportata solo una versione

alta 110 cm del progetto, da usare per un giardino di dimensioni ridotte, la struttura e le capacità sono state concepite anche per scale superiori, da usare in spazi pubblici, o giardini più ampi.

La passività del processo è tuttavia anche un limite, giacché il fenomeno di condensazione si verifica solo a determinate condizioni di umidità relativa e temperatura. Per tale ragione si consiglia il posizionamento in zone umide, quali prati, e in penombra, in modo tale che il dispositivo non riceva costantemente i raggi solari. Inoltre bisogna anche considerare che le tecnologie su cui si basa il progetto non sono mai state testate in ambiente reale, ma solo in laboratorio, e perciò la loro resa non è certa.

Tuttavia con le dovute sperimentazioni le eventuali problematiche possono essere risolte.

# Bibliografia

Terenzi, B., & Mecca, S. (2017, febbraio). *Zoomorfismo, biomimetica e design computazionale*. *Agathón - International Journal of Architecture, Art and Design*, 205-212

Salvia, G., Rognoli, V., & Levi, M. (2009). *Il Progetto della Natura - Gli strumenti della biomimesi per il design*. Milano: Francoangeli

Benyus, J. (2002 ). *Biomimicry - Innovation Inspired by Nature*. Perennial: William Morrow

Bernett, A. (2015, gennaio 17). *Biomimicry, Bioutilization, Biomorphism: The Opportunities of Bioinspired Innovation*. Tratto da Terrapin Bright Green: <https://www.terrapinbrightgreen.com>

Buiatti, E. (2014). *Forma Mentis - Neuroergonomia sensoriale applicata alla progettazione*. Milano: Francoangeli.

Dresser, C. (1862). *The art of decorative design*. In G. Salvia , V. Rognoli, & M. Levi, *Il Progetto della Natura*.

Dawkins, R. (2011). *The Magic of Reality*. In E. Buiatti, *Forma Mentis - Neuroergonomia sensoriale applicata alla progettazione* (p. 14). Milano: Mondadori.

Mancuso, S. (2017). *Plant Revolution*. Milano: Giunti Editore.

Guadarrama-Cetina, J., Mongruel, A., Medici, M.-G., Baquero, E., Parker, A., Milimouk-Melnytchuk, I., . . . Beysens, D. (2014). *Dew condensation on desert beetle skin* . *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL E*.

Yang, J., Zhang, X., Zhang, X., Wang, L., Feng, W., & Li, Q. (2021). *Beyond the Visible: Bioinspired Infrared Adaptive Materials*. Wiley Analytical Science Conference. *Advanced Materials*.

Atiganyanun, S., Plumley, J. B., Han, S. J., Hsu, K., Cytrynbaum, J., Peng, T. L., . . . Han, S. E. (2018). *Effective Radiative Cooling by Paint-Format Microsphere-Based Photonic Random Media*. *ACS Photonics*.

Museum für gestaltung Zürich, 2007

Nørgaard, T., & Dacke, M. (2010). *Fog-basking behaviour and water collection efficiency in Namib Desert Darkling beetles*. *Frontiers in zoology*.

# Sitografia

Biomimicry Institute. (2022). Nature's Unifying Patterns. Tratto da Biomimicry Toolbox: <https://toolbox.biomimicry.org>

Biomimicry Institute. (2022). Other Pathways to Biomimicry. Tratto da Biomimicry Toolbox: <https://toolbox.biomimicry.org>

Kobayashi, K. (2005, marzo 31). The Beak That Inspired a Bullet Train. Tratto da Ask Nature: <https://asknature.org>

Benyus, J. (2015-2022). Methods - The Biomimicry Design Process. Tratto da Biomimicry Toolbox: <https://toolbox.biomimicry.org>

Bonser, R. (2005). Materials World. A design for life, 13(4), 21.

NASA Team, E. S. (2022, Agosto 15). Human Activity Is the Cause of Increased Greenhouse Gas Concentrations. Tratto da NASA - Global Climate Change: <https://climate.nasa.gov>

IPCC. (2022). Cambiamenti climatici: una minaccia al benessere delle persone e alla salute del pianeta. Agire ora può mettere al sicuro il nostro futuro. Tratto da IPCC Italia: <https://ipccitalia.cmcc.it>

Geographic, N. (2020, marzo 4). Crisi dell'acqua dolce. Tratto da National Geographic: <https://www.nationalgeographic.it>

Pasini, A. (2018, Novembre 22). Riscaldamento globale: quanto conta il vapore acqueo emesso dalle attività umane? Tratto da Le Scienze Blog: <http://pasini-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it>

Focus. (2019). Ecologia I dissalatori d'acqua sono indispensabili, ma producono scorie pericolose per l'ambiente. Tratto da Focus: <https://www.focus.it>

ANSA. (2022, Giugno 7). Acqua: da siccità 8mln morti anno. Tratto da ANSA: <https://www.ansa.it>

Ferrari, A. (2020, marzo 31). I fringuelli di Darwin. Tratto da Biopills: <https://www.biopills.net>

Ask Nature. (2022, Febbraio 23). Leaves Capture Water From Fog. Tratto da Ask Nature: <https://asknature.org>

Ask Nature. (2016, Settembre 14). Desert Plants Offer New Twist on Gathering Water From Air. Tratto da Ask Nature: <https://asknature.org>

Pardini, A. (2018, Novembre 11). La Nebbia e i vari tipi. Tratto da Rete meteo amatori: <https://www.retemeteoamatori.it>

Treccani, E. (s.d.). Rugiada. Tratto da Treccani: <https://www.treccani.it>

Treccani, E. (s.d.). Nicchia ecologica. Tratto da Treccani : <https://www.treccani.it>

Treccani, E. (s.d.). Mutualismo. Tratto da Treccani : <https://www.treccani.it>

Treccani, E. (s.d.). Commensalismo. Tratto da Treccani : <https://www.treccani.it>

CEMER (2015, Settembre 15) Come calcolare il dew point? Tratto da CEMER: <https://www.cemer.it>

Gruppo CAP. (2021, Settembre 24). Acqua nel mondo: quello che c'è da sapere sull'Oro Blu. Tratto da Acqua del Rubinetto: <https://acquadelrubinetto.gruppocap.it>

Wikipedia. (2020, Aprile 22). Clima monsonico. Tratto da Wikipedia: <https://it.wikipedia.org>

Wikipedia. (2022, Febbraio 23). Clima equatoriale. Tratto da Wikipedia: <https://it.wikipedia.org>

Wikipedia. (2021, Maggio 27). Clima della savana. Tratto da Wikipedia: <https://it.wikipedia.org>

IgroDry. (2022, Agosto 18). L'umidità atmosferica in Italia. Tratto da IgroDry: <https://www.igrodry.com>

Treccani. (2008). Nucleazione. Tratto da Enciclopedia Treccani: <https://www.treccani.it>

van Daal, L. (2017). BIO INSPIRED BICYCLE SADDLE. Tratto da Lilian van Daal: <https://www.lilianvandaal.com>

van Daal, L. (2017). Radolaria #1 - fragments of nature. Tratto da Lilian van Daal: <https://www.lilianvandaal.com>

van Daal, L. (2017). BIOMIMICRY - 3D PRINTED SOFT SEAT. Tratto da Lilian van Daal: <https://www.lilianvandaal.com>

Studio Aisslinger. (2022, agosto 31). Coral seating. Tratto da Studio Aisslinger: <https://www.aisslinger.de>

Lindsay, C. (2020, ottobre 22). Michael Pawlyn. Tratto da Dezeen: <https://www.dezeen.com>

Nagami. (2022). Bow and Rise. Tratto da Nagami: <https://nagami.design>

Moroso. (2022). Supernatural . Tratto da Moroso: <https://moroso.it>

Laarman, J. (2022). Bone chair. Tratto da Joris Laarman Lab: <https://www.jorislaarman.com>

Hybrid Design Lab. (2021). Nebula. Tratto da Hybrid Design Lab: <https://www.hybriddesignlab.org>

Hybrid Design Lab. (2021). Diatomea. Tratto da Hybrid Design Lab: <https://www.hybriddesignlab.org>

Hybrid Design Lab. (2021). Phylum Ctenophora . Tratto da Hybrid Design Lab: <https://www.hybriddesignlab.org>

F1 Fragrances. (2022). Innovation design. Tratto da F1 Fragrances: <https://f1fragrances.com>

# Iconografia

01. **Mosaico sul soffitto della Tomba di Hafez**, a Shiraz
02. **Navata della Sagrada Familia** da tradurrepereditoria.com
03. **Ragno tigre** (*Nephila pilipes*), da esquire.com, di Lorenzo Tombola
04. **Imballaggi prodotti da Ecovative Design**, da atlasofthefuture.org
05. **Tavolo di Carlo Mollino**, 1949, esempio di biomorfismo, da sothebys.com
06. **Pigne del Pinus contorta**, da flickr.com
07. **Mutualismo tra anemone e pesce pagliaccio**, da ansa.it
08. **Bardana** (*Arctium lappa*) **ed estremità a unicino**, da wired.it
09. **Martin pescatore in procinto di tuffarsi in acqua**, da rickytrevisani.wordpress.com, Riccardo Trevisani
10. **Spirale del Design**, da biomimicry.org, di Janine Benyus, Dayna Baumeister con il supporto grafico di Carl Hastrich
11. **Biomimicry 3D Printed soft chair**, da lilianvandaal.com
12. **Coral Seating**, da aisslinger.de
13. **3D Printed Table**, da dezeen.com
14. **Fragranza Formula 1**, da dlmag.com
15. **Serie Supernatural chair**, da moroso.it
16. **Sedute Bow and Rise**, da nagami.design
17. **Bone chair**, da jorislaarman.com
18. **Radolaria #1**, da lilianvandaal.com
19. **Sellino bioispirato**, lilianvandaal.com

20. **Lampada Nebula**, da [hybriddesignlab.org](http://hybriddesignlab.org)
21. **Diafanea**, da [hybriddesignlab.org](http://hybriddesignlab.org)
22. **Phylum Ctenophora**, da [hybriddesignlab.org](http://hybriddesignlab.org)
23. **Piante di fico d'India, famiglia delle Cactacee**, da [aziendascollosebastiana.it](http://aziendascollosebastiana.it)
24. **Agave**, da [unsplash.com](http://unsplash.com)
25. **Albuca spiralis**, da [venditapianteonline.it](http://venditapianteonline.it)
26. **Welwitschia mirabilis**, da [angolodellamicizia.forumfree.it](http://angolodellamicizia.forumfree.it)
27. **Coleottero delle nebbie**, da [flickr.com](http://flickr.com)
28. **Diagramma psicrometrico**, da Wikipedia
29. **Rappresentazione grafica dell'umidità relativa media registrata in Italia nel 2017**
30. **Rapporto tra acqua dolce e salata nel mondo**
31. **Ripartizione dell'acqua dolce**
32. **Distribuzione tra i tre settori nell'uso di acqua dolce**
33. **Illustrazione della raccolta dell'acqua sfruttando le cime idrofiliche e le valli idrofobiche delle elitre**
34. **Warka Tower**, da [warkawater.otg](http://warkawater.otg)
35. **Seas**, da [seas-sa.com](http://seas-sa.com)
36. **Roots Up**, da [rootsupsolutions.org](http://rootsupsolutions.org)
37. **Groasis Waterboxx**, da [groasis.com](http://groasis.com)
38. **Fog Quest**, da [fogquest.org](http://fogquest.org)
39. **Spettro elettromagnetico**, da [radio2space.com](http://radio2space.com)
40. **Render con dettaglio della condensazione dell'acqua sul tessuto**
41. **Render ambientato notturno e diurno**
42. **Sezione renderizzata con dettaglio soluzione per stabilità**



# Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito con i loro preziosi consigli, osservazioni e critiche alla stesura della tesi. *In primis* vorrei ringraziare la Professoressa Silvia Barbero, relatrice di questo elaborato, per la disponibilità e professionalità dimostrata durante tutto il periodo di stesura; le sono grata per aver accettato di intraprendere con me questo percorso.

Per la generosità nel condividere con me le loro conoscenze, mi sembra doveroso ringraziare la Dottoressa Chiara Novara e gli Ingegneri Francesco Lanteri e Mario Amadasi. Gli incontri casuali conducono sempre verso sviluppi inaspettati.

Un grazie a te, Chiara, che con il tuo amore per la conoscenza e la tua gentilezza hai contribuito a rendere questo progetto reale.

Alla mia famiglia, grazie, grazie e ancora grazie per esserci sempre, incondizionatamente, nei momenti di gioia e soprattutto di difficoltà, per avermi sempre spronata ad andare incontro ai miei obiettivi con determinazione, ma senza mai dimenticare i miei valori. In particolare, un ringraziamento speciale a te, papà, per il tempo dedicato e la sincerità con cui mi hai aiutata durante tutto il percorso.

A te, mamma, grazie per la costanza e la pazienza che solo una mamma può avere nell'accompagnarmi nel cammino di ogni giorno.

A te, Rebs, per essere sempre il mio porto sicuro.

Un pensiero speciale va anche alle mie nonne e a mio nonno; avrei voluto che oggi ci fossi anche tu, ma, anche se non fisicamente, sono certa che mi sta accompagnando in questo viaggio.

