



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CHILE
FACULTAD DE ARQUITECTURA
DISEÑO Y ESTUDIOS URBANOS
ESCUELA DE ARQUITECTURA

Habitar el desierto

Inercia térmica y ventilación como factores de diseño
para el confort de viviendas en densidad media de zona árida

POR BENJAMÍN HERRERA

Tesis para optar al grado académico de Magister
en Arquitectura Sustentable y Energía

Profesores guía

Javier del Río Ojeda - Felipe Encinas Pino

Enero 2020 - Santiago, Chile

©2020 Benjamín Herrera Muñoz

Derechos de Autor

Se autoriza la reproducción total o parcial
con fines académicos por cualquier medio
o procedimiento, incluyendo la cita
bibliográfica del documento

Resumen

En el último tiempo y a lo largo del mundo se ha venido incorporando una conciencia tanto económica como ambiental en el ámbito de la construcción, reflejada a través de certificaciones y estándares capaces de generar un ahorro energético de hasta un 75% respecto a una vivienda convencional. Ejemplo de ello es el concepto o estándar **NZEB** (Net Zero Energy Building), implementado en países europeos y norteamericanos a fin de reducir una dependencia de la energía fósil y cuyo foco se encuentra en lograr un consumo energético capaz de ser satisfecho por la misma construcción en ayuda de estrategias pasivas y fuentes alternativas de energía. Tal inquietud se ha extendido a otros países para considerar su aplicación en diversos climas los cuales pueden representar un desafío.

La integración de este estándar en Chile apenas se encuentra en marcha, relegando sectores urbanos en desarrollo que presentan aquellas dificultades climáticas a soluciones estandarizadas en manos del mercado inmobiliario. Tal es la situación de Copiapó, ciudad cuyo crecimiento y amplias diferencias de temperatura en mismo día y a lo largo del año permite pensar en mejores estrategias para el desarrollo de viviendas de mayor densidad y un mejor desempeño energético de confort abordado desde el diseño pasivo con tal de poseer un estándar asequible y atractivo.

Es así como la investigación centra su estudio en la posibilidad de contar con una aproximación pasiva de diseño en base a recursos locales -tierra y viento en términos de inercia térmica y ventilación-, como medida inicial para favorecer el estándar **NZEB** en un contexto de sequía y para viviendas de densidad media, apuntando a un confort térmico en contraste con aquellas soluciones constructivas tradicionales basadas en la implementación de equipos eléctricos, para así acortar una brecha tanto económica como tecnológica que obstaculiza su implementación.

Para ello se realizan estudios en terreno que recogen algunas características actuales de confort al interior de viviendas reflejados en encuestas y observaciones espaciales, junto con un análisis bibliográfico ligado a la posibilidad de implementar aquel estándar en base a estrategias de diseño pasivo utilizando el recurso local. Se finaliza con una aproximación de diseño a través de simulaciones de flujo de viento para tener noción de cuáles son las características espaciales que debe poseer una vivienda del tipo pasivo en densidad media para lograr un mejor desempeño energético y de confort al norte de Chile en base a lo anterior.

PALABRAS CLAVE: arquitectura sustentable, eficiencia energética, confort, diseño pasivo, clima árido, Copiapó.

Índice

1	Introducción	5	3	Confort térmico y eficiencia energética ligado a estrategias de diseño pasivo en zona árida	35
1.1	Contexto y planteamiento del problema ...	5	3.1	NZEB/ZEB: Concepto y posibilidades de implementación a través de estrategias pasivas de diseño	35
1.2	Formulación de la investigación	7	3.2	Estudio de referentes contemporáneos en zona árida	37
	Preguntas de investigación	7		Orientación y forma en base a ganancias solares y ventilación	37
	Hipótesis	8		Utilización de aleros como atrapavientos	38
	Objetivo general	8		Construcción de masa y vanos reducidos	38
	Objetivos específicos	8		Cubierta de efecto convectivo o disipador	40
	Metodología	8		Espacios ajardinados intermedios	41
	Alcances	8		Porosidad y rugosidad en superficies divisorias	41
2	Caracterización de Copiapó	10		Síntesis de estrategias utilizadas en referentes contemporáneos	42
2.1	Condición climática y geográfica en la ciudad para efectos de diseño	10	3.3	Alternativa proyectual bajo el concepto de ventilación e inercia térmica	43
	Condiciones de temperatura	10		Estudio iterativo de ventilación a través de simulación digital	43
	Condiciones de soleamiento: radiación y trayectoria solar	12		Síntesis proyectual y partido general	48
	Condiciones de viento y efectos sobre el confort térmico	14	4	Conclusiones	58
	Condición de suelo y posibilidades de uso	20	5	Anexos	60
	Consideraciones del material y la técnica del tapial	22	6	Referencias	63
	Ventilación e inercia térmica en conjunto: enfriamiento nocturno	25			
2.2	Estado actual de viviendas en relación a su desempeño térmico de confort	27			
	Sondeo respecto a vivienda y percepción de confort interior estacional en Copiapó	27			
	Caracterización de la oferta inmobiliaria actual en Copiapó	31			

1. Introducción

1.1. Contexto y planteamiento del problema

A medida que las temperaturas en países cálidos se intensifican producto del cambio climático, existe una creciente preocupación por el aumento en el número de sistemas eléctricos utilizados para compensar la demanda de refrigeración y calefacción, cuyo gasto energético a futuro podría ser capaz de sobrecargar la red eléctrica y acrecentar las emisiones de gases de efecto invernadero a casi el doble para el año 2050, contribuyendo al mismo problema por medio de plantas generadoras que operan en base a combustibles fósiles tales como el gas natural o el carbón (Pierre-Louis, 2018).

El uso de estos sistemas eléctricos en el que destacan ventiladores y equipos de aire acondicionado, a fin de aumentar el confort en zonas donde el estándar de vida e ingresos observan un aumento estable, tiende a verse acrecentado (en el caso de enfriamiento) por el efecto isla de calor debido al aire caliente expulsado por parte de estos equipos hacia el ambiente en zonas densificadas y el tipo de superficie que estas presentan, propiciando el uso de los mismos por parte de otros habitantes.

Es por ello que el enfriamiento, como una necesidad ligada al confort al igual que la calefacción no hace más que aumentar en diversos países (figura 1) bajo un contexto que motiva su implementación artificial debido a una mayor cantidad de viviendas y menor costo (figura 2), formando parte importante de una de las etapas correspondientes a la edificación con mayor consumo energético y emisión de CO2 (Wassouf, 2014), en donde la arquitectura cobra especial relevancia a modo de atenuar o agravar dichas necesidades.

Para tales efectos, existen reglamentaciones vinculadas a cada país que establecen requisitos mínimos de sostenibilidad para un consumo energético responsable de acuerdo a las particularidades de cada territorio e intereses políticos vigentes, reglas que muchas veces resultan insuficientes respecto a las demandas e intereses globales capaces de ofrecer un mejor estándar (tanto en desempeño energético como de confort) por medio de un uso consciente de recursos locales, aunque en mayor medida, de sistemas eficientes.

Este es el caso del concepto *Net Zero Energy Building* (o *NZEB* por sus siglas en inglés), referido a edificios con un balance energético nulo obtenido a través de la integración de componentes arquitectónicos pasivos en diálogo con sistemas activos eficientes y generadores de energía a partir de fuentes renovables, el cual es aplicado mayoritariamente a inmuebles de carácter residencial y comercial, en donde se busca un consumo energético (en este caso eléctrico) equivalente al producido por la misma edificación sin perjudicar la calidad del ambiente o confort interior en recintos.

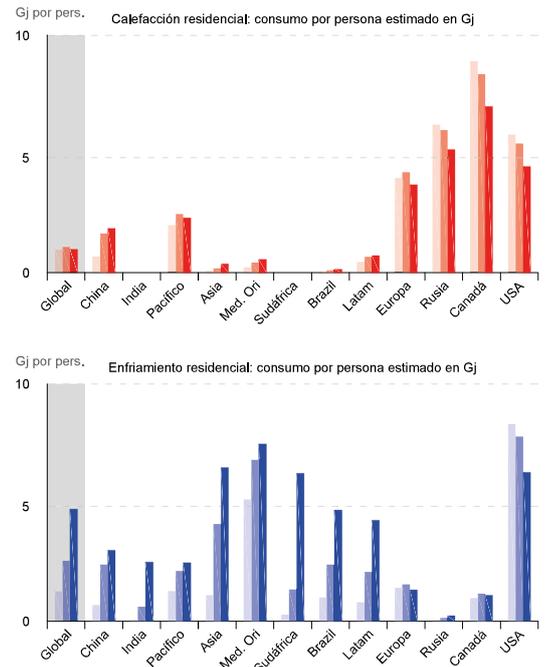


FIGURA 1
Gráficos de consumo energético para calefacción y enfriamiento residencial estimado hacia 2050.
 Consumo medido en Giga Joules por persona respecto a distintos países en 3 periodos.
 Fuente: Clarke, Eom, Hodson, Horowitz, Kyle, Link, Zhou (2018), p. 673

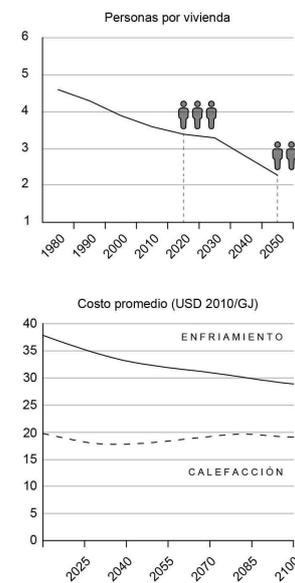


FIGURA 2
Disminución en el número de personas por vivienda y costos de enfriamiento
 Datos globales estimados para el año 2050 y 2100

Fuente: Elaboración propia basada en Clarke et al (2018), p. 674 y Barreneche, Cabeza, Petrichenko, Serrano, Üрге-Vorsatz (2015), p. 89.

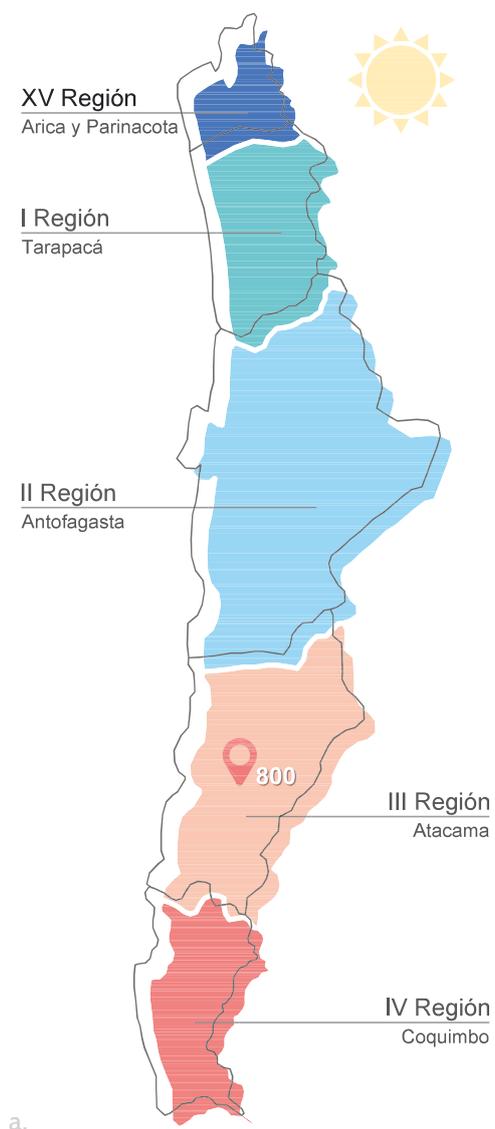


FIGURA 3

a. Regiones del norte de Chile y demanda habitacional presente en Copiapó

En conjunto, las regiones comprenden un extenso territorio nacional de régimen árido que equivale al 52% del total. En el caso de Copiapó, se prevé una necesidad habitacional constante anual de al menos 800 unidades (Censo 2002)

b. Registro histórico de temperatura entre estas regiones

La tercera región de Atacama se presenta con las temperaturas más elevadas en comparación durante el periodo cálido del año

Fuente: Elaboración propia en base a datos proporcionados por la Dirección Meteorológica de Chile y resultados del censo en 2002.

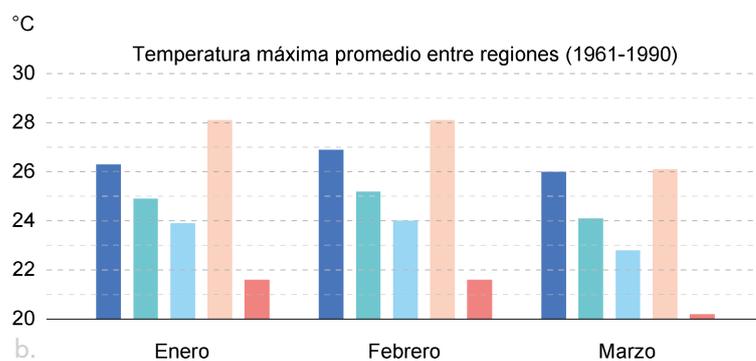
Este último concepto de balance energético nulo fue recientemente precisado por el Department of Energy (DOE) de Estados Unidos junto con el National Institute of Building Sciences (2015) a fin de adoptar un consenso general por parte de la industria inmobiliaria y así reducir el impacto de consumo energético del mismo grupo, capaz de concentrar más de un 50% del total en aquel país sin la aplicación de estas medidas (National Institute of Standards and Technology, 2010)

En la actualidad, su implementación junto al estándar *Passivhaus* (el cual se enfoca específicamente en la consecución de un ambiente interno normado) se le conoce como *Healthy Net Zero* (Attia, Moeseke, Piderir, Vivanco, 2019), el cual observa en el área residencial una implementación cada vez más firme a medida que el crecimiento demográfico plantea nuevos desafíos para la sostenibilidad ecológica y económica de los países, reflejado en acuerdos tales como el New Residential Zero Net Energy Action Plan 2015-2020 (2016) de California, o el plan presentado por la Unión Europea en 2018 donde se pone de manifiesto la importancia de los mismos tipos constructivos (Bloomberg, 2018) en el marco del Acuerdo de París sobre el cambio climático, donde algunos países pretenden llegar a cero emisiones para el año 2050 (Parlamento Europeo, 2019).

Chile por su lado no se encuentra exento de esta responsabilidad, encontrando como desafío vigente contar con mejores alternativas para reducir la emisión de contaminantes desde el área energética, reflejado en los altos índices de emisiones por sector hasta el año 2016 debido al consumo eléctrico, convirtiéndose en un factor relevante (Gobierno de Chile, 2018).

El desarrollo de este nuevo tipo de viviendas con un alto desempeño energético y de confort como alternativa para la sostenibilidad del país en materia ecológica y económica durante los últimos años ha sido más bien lenta o escasa, en un contexto donde la reglamentación térmica actual es el estándar de construcción para todas sus regiones, omitiendo así un potencial de ahorro energético cuyo impacto ambiental no es menor. Este mismo avance sujeto a estándares internacionales queda muchas veces relegado a edificaciones de gran envergadura fuera del área residencial, cuyo emplazamiento además se limita a la zona centro y sur del país, presentando una oportunidad poco explorada en términos de desempeño energético para la zona norte del mismo, cuyo clima seco se extiende por cerca de la mitad del territorio nacional (Durán, 2018).

Es así como se toma uno de los casos más críticos en cuanto a temperatura de confort comenzando por el periodo cálido de verano (figura 3) cuya demanda habitacional continúa hasta la fecha en la región de Atacama; esto es, Copiapó.



Colores referente a regiones se encuentran representados en el mapa superior izquierdo

De régimen árido o desértico transicional según la clasificación de Köppen (Juliá, C., Maldonado, A., Montecinos, S., 2008), la ciudad de Copiapó se distingue por sus altas temperaturas a lo largo del año (figura 4), capaces de mantener el espacio exterior dentro de un rango de confort a la sombra, lo que no ocurre tanto así para espacios interiores que tienden a sobrecalentarse producto de ganancias internas prolongadas como resultado de un diseño que no logra encajar en su entorno y constituye parte de un repertorio común para el resto del país (Durán, 2018).

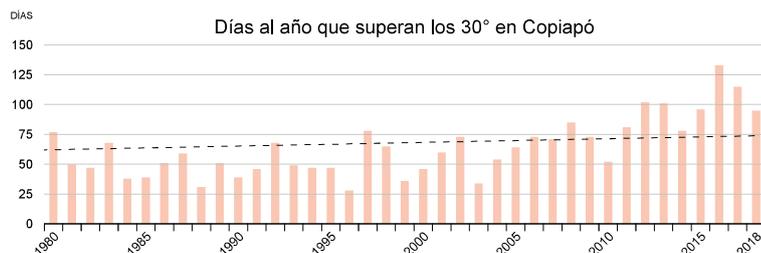


FIGURA 4
Gráfico de temperatura: días que superan los 30 grados para la ciudad de Copiapó en un periodo de 39 años
 Existe una tendencia de rápido aumento respecto a la cantidad de días en las últimas décadas.

Fuente: Dirección Meteorológica de Chile

■ Número de días Altura: 346 mts.
 --- Tendencia Latitud: -27,35000°
 Longitud: -70,41000°

Es por ello –y debido a una constante necesidad de densificación en el sector– que la ciudad presenta una condición de reflexión sobre posibles adaptaciones bioclimáticas a través de espacios que responden al desarrollo de un mejor desempeño energético y de confort en vivienda, apoyado en la sustentabilidad mediante el uso de recursos locales cuyo foco se encuentra dado por la ventilación e inercia térmica; potenciadores de estrategias frecuentes tales como la orientación en relación al sol para generar sombras y la utilización de plantas propiciadoras de un microclima.

De esta forma, la investigación pretende entregar nociones respecto al potencial que el carácter local puede ofrecer para un diseño cuyo foco es de enfriamiento pasivo en vivienda que apunta a cumplir el estándar *NZEB* con la ayuda de fuentes renovables, en el contexto de un clima donde el aporte de humedad y el uso del recurso hídrico se encuentra sujeto a un creciente índice de sequías. Esto, con la ayuda de simulaciones, análisis bibliográfico de las principales estrategias propuestas y encuestas en terreno capaces de entregar un mejor entendimiento respecto a las maneras en que se habita, otorgando una mirada identitaria característica del sector y su clima en donde las necesidades espaciales y materiales difieren de otras regiones.

1.2. Formulación de la investigación

Preguntas de investigación

- ¿Qué tan efectivo resulta implementar estrategias bioclimáticas basadas en el carácter local (climático-geográfico) para alcanzar el confort térmico y el ahorro energético a través del diseño arquitectónico?
- ¿Cuáles son las mejores opciones en cuanto a diseño espacial que se encuentran en diálogo con las formas de habitar y los recursos disponibles del sector?

Hipótesis

Es posible utilizar estrategias bioclimáticas en un contexto árido chileno respecto al diseño de espacios en edificios de mediana densidad, capaces de aportar al confort térmico y disminuir así el consumo de energía eléctrica para alcanzar un estándar internacional en una solución arquitectónica que rescata la identidad geográfica del sector.

Objetivo general

Explorar las capacidades y limitaciones que presentan las estrategias pasivas propias del sector para el desarrollo de viviendas en contexto árido, entregando una mirada crítica respecto a las opciones de diseño espacial que permiten una mejor adaptación al confort térmico de espacios y al estándar internacional *NZEB*.

Objetivos específicos

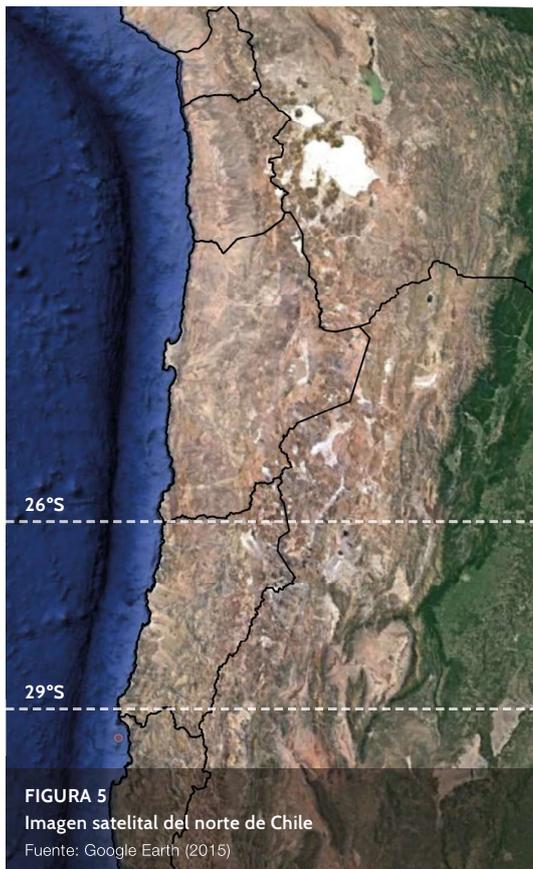
- Desarrollar estrategias de diseño pasivo en conjunto con énfasis en enfriamiento y en diálogo con el clima en que se inserta, respondiendo a las características arquitectónicas presentes en la ciudad
- Crear espacios propicios para el confort térmico interior en miras de un estándar de alto desempeño energético
- Contar con un análisis respecto a opciones de diseño en base al viento por medio de simulación digital a fin de aportar al confort térmico

Metodología

- Caracterizar el actual comportamiento de viviendas en cuanto a desempeño energotérmico en contexto climático a través de:
 - Análisis en base a datos históricos de clima para Copiapó
 - Encuestas de percepción y hábitos de enfriamiento en vivienda
- Explorar la relación entre estrategias de enfriamiento pasivo para clima árido basado en ventilación e inercia térmica como aproximación al concepto *NZEB* para el confort térmico:
 - Estudio de estrategias basadas en el recurso local y su efecto en el confort térmico al interior de recintos
 - Estudio de referentes contemporáneos en clima árido
 - Análisis iterativo de estrategias de acuerdo a ventilación (simulaciones en programa Flow Design)

Alcances

La investigación apunta al desarrollo de espacios para el confort térmico en viviendas de densidad media como alternativa para una tipología necesaria en un contexto donde la transición entre viviendas de hasta dos pisos y torres resulta escasa. Esto, sumado a la posibilidad de implementar estrategias en base al recurso local (ventilación e inercia térmica) cuyo uso resulta dificultoso en torres y frecuente en viviendas unifamiliares. Ello, con el fin de acercar este tipo de edificación en densidad media a un mejor estándar cada vez más presente en el ámbito de la construcción para una ciudad cuyo crecimiento determinará en gran manera las necesidades energéticas de la región en un esfuerzo descentralizador capaz de formar una identidad arquitectónica que hace frente a las exigencias de un territorio árido.



2. Caracterización de Copiapó

2.1. Condición climática y de suelo en la ciudad para efectos de diseño

Condiciones de temperatura

Localizada entre la zona xérica de la Región de Antofagasta y la zona árida de la Región de Coquimbo, La Región de Atacama (de latitudes sur 26 a 29°, figura 5) encuentra sus características climáticas determinadas por la presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur, la corriente fría marina de Humboldt y la presencia de la Cordillera de los Andes. Aquello, sumado a la compleja topografía del sector establecen las escasas tasas de precipitaciones concentradas en los meses de invierno (figura 6) que dan paso a una región árida de grandes superficies privadas de vegetación, cuya intensidad se ve atenuada a partir de los 27° de latitud sur debido a la presencia de recursos hídricos provenientes de la cordillera que atraviesan los valles transversales capaces de permitir el desarrollo de actividades agrícolas y la existencia de un mayor contenido de humedad en el aire (Juliá, Montecinos, Maldonado, 2008).

La presencia del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur condiciona una baja nubosidad en la zona interior, lo que determina a su vez una mayor incidencia de radiación y con ello un aumento de las temperaturas a nivel de suelo; un factor a considerar dentro de la gran amplitud térmica existente a nivel de superficie entre el día y la noche.

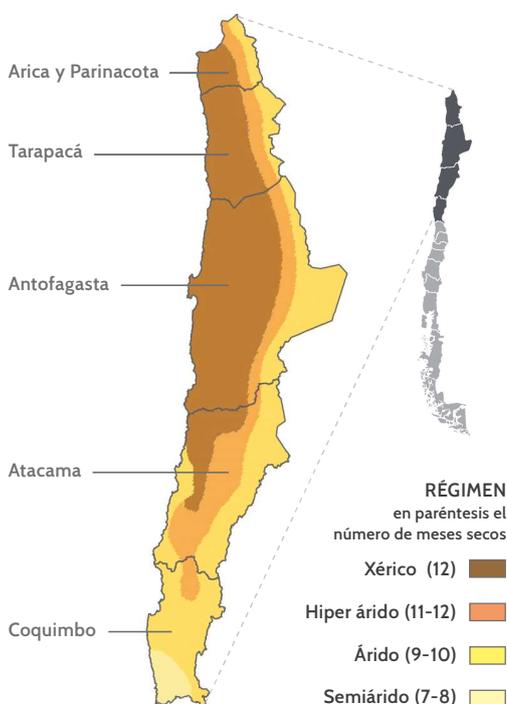


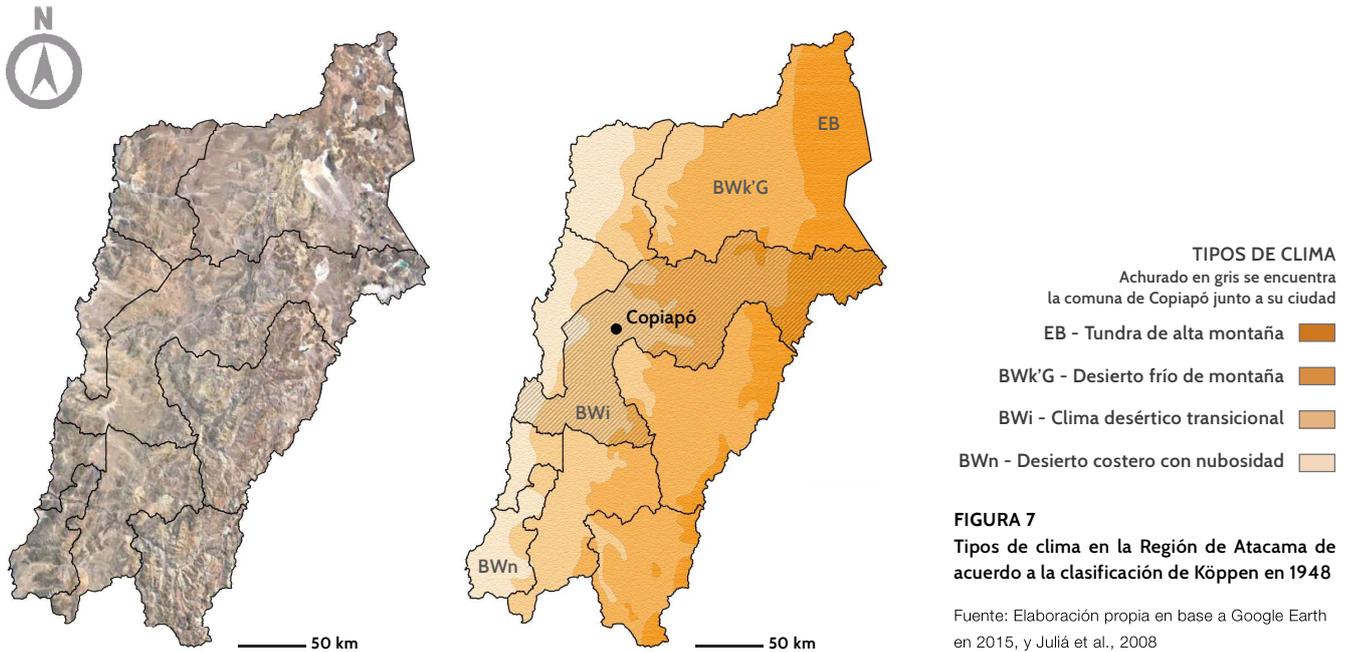
FIGURA 6
Regiones del norte de Chile y su régimen árido

Fuente: Elaboración propia en base a Gabriels, Santibáñez, Soto, Verbist, 2010.

Debido a la variedad de matices climáticos ocasionados en región por las condiciones anteriormente señaladas y en conjunto con un sistema de relieve capaz de condicionar las influencias oceánicas y de viento a nivel de valle, se utiliza el sistema de definición de climas presentado por Köppen con tal de exponer de manera sintética aquellos aspectos climáticos de mayor relevancia, en este caso, para la ciudad de Copiapó, capital tanto de la comuna de nombre homónimo como de la Región de Atacama y cuya importancia viene dada por su posición clave respecto a la economía y administración de la provincia y región.

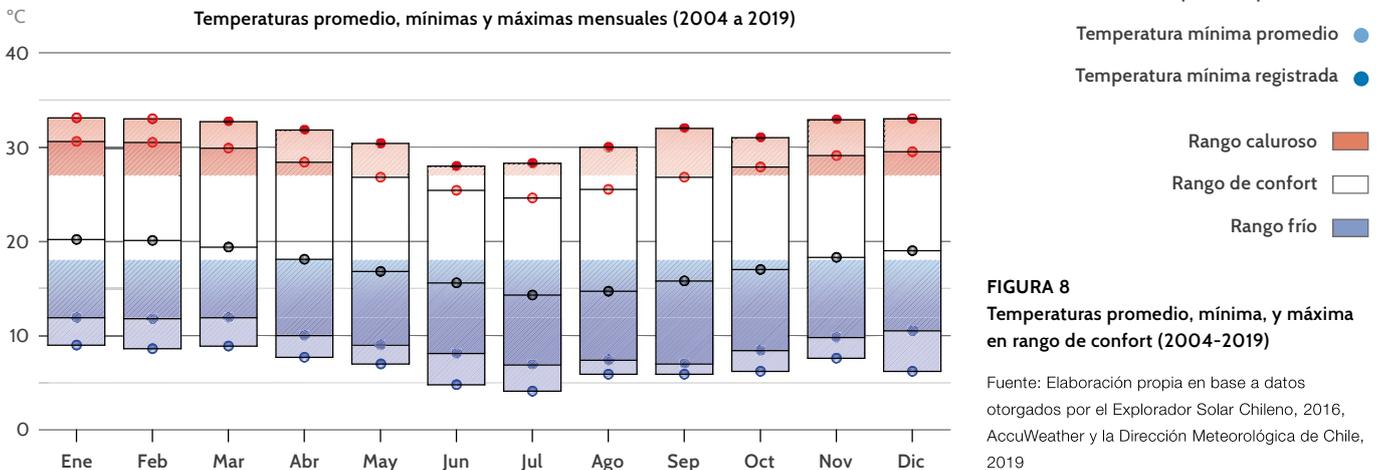
De carácter desértico transicional (o BWi según Köppen, figura 7), la ciudad de Copiapó se encuentra ubicada en una zona hiper árida con precipitaciones anuales escasas y usualmente nulas de acuerdo a los últimos datos recogidos por la Dirección Meteorológica de Chile, donde la influencia costera no logra ejercer cambios significativos en cuanto al aporte de nubosidad y con ello una disminución en la amplitud térmica respecto a otras zonas ubicadas hacia el oeste. De esta manera, se cuenta con un gran porcentaje de días despejados en donde el mayor valor de nubosidad no supera el 9% en promedio para el mes de mayor concentración en horario diurno, con un total aproximado de 312 días completamente despejados (Meteoblue, 2019).

La temperatura media anual en la ciudad (tomada en base a datos registrados de un periodo de 12 años por el Explorador Solar y comparados con información otorgada por la Dirección Meteorológica de Chile y AccuWeather en el último año), es de 17,4 °C, con promedios mensuales



que van desde los 14,3 hasta los 20,2°C desde el mes más frío al más cálido.

Considerando un intervalo de confort interior que va desde los 18 a los 27°C definido desde la temperatura límite en la cual es necesario calefaccionar durante invierno en términos de grados-día y la temperatura de confort en verano de acuerdo a la guía de diseño elaborada por Bustamante en 2009 (figura 8), se puede observar que la mayor variación de temperatura respecto a la de promedio mensual se inclina hacia el periodo frío presente en las noches tanto de invierno como de verano entre las 0:00 y 7:00 hrs., suponiendo en este último y debido a ello una gran amplitud térmica propia de la zona (figura 9). Por otro lado, se observa que gran parte del tiempo las temperaturas asociadas al horario diurno (por efecto del sol) y a las de mayor actividad al interior de recintos se encuentran dentro de la zona de confort con una variación general de 3°C entre tal rango y la temperatura máxima promedio durante los meses de mayor calor, lo cual sugiere el uso de un recurso disponible capaz de cubrir tal diferencia adaptando el rango de confort térmico: el viento. De manera similar, se pretende atenuar los efectos asociados al frío a lo largo de la noche implementando la inercia térmica propia de sistemas constructivos llevados a cabo con material del sector, es decir, la tierra.



Temperatura promedio mensual a lo largo del día

11:00	16	16	16	15	14	13	12	12	12	13	14	15
10:00	17	17	16	15	14	13	12	12	12	13	15	15
9:00	18	18	17	16	15	14	13	13	13	14	16	17
8:00	20	20	19	18	16	15	14	14	15	16	18	18
7:00	22	22	21	19	18	17	16	16	17	19	20	21
6:00	25	25	23	21	20	19	18	18	20	21	23	24
5:00	27	27	26	25	23	22	21	22	23	25	26	26
4:00	29	29	28	27	25	24	23	24	25	26	27	28
3:00	30	30	29	28	26	25	24	25	26	27	29	30
2:00	31	31	30	28	27	25	25	26	27	28	30	30
1:00	30	30	29	27	26	24	24	25	26	27	28	29
12:00	28	28	27	25	24	22	22	23	24	25	27	27
11:00	26	26	25	23	22	21	20	21	22	24	25	25
10:00	23	23	21	20	18	17	16	17	19	21	22	23
9:00	20	20	18	16	15	13	12	13	16	17	19	20
8:00	18	17	15	13	12	10	9	10	12	14	15	17
7:00	15	14	13	11	10	9	8	9	9	11	13	14
6:00	12	12	12	10	9	8	7	8	7	8	10	11
5:00	12	12	12	11	10	9	8	7	8	9	10	11
4:00	12	13	13	12	11	10	8	8	9	10	11	11
3:00	13	14	13	12	11	10	9	9	9	10	11	12
2:00	14	14	14	13	12	11	9	9	10	11	12	12
1:00	14	15	14	14	13	12	10	10	11	11	13	13
0:00	15	15	15	14	13	12	11	10	11	12	13	13
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

FIGURA 9

Gráfico de temperaturas promedio diarias al mes

Se aprecia la diferencia en cuanto a horas que se alejan del rango de confort térmico (en azul y rojo) correspondientes al periodo cálido y frío en un mismo día

Fuente: Elaboración propia en base a datos otorgados por el Explorador Solar Chileno, 2016

Condiciones de soleamiento: radiación y trayectoria solar

Además de poseer una de las temperaturas máximas promedio más altas en comparación a otras regiones del norte de Chile como se presentó en un comienzo, el sector de Copiapó recibe uno de los índices más altos en cuanto a radiación promedio al año a nivel internacional debido a sus cielos despejados, convirtiéndose en la segunda ciudad con mayor radiación incidente en el país después de Calama. Es por ello y pese a que gran parte del día se encuentra en un rango de confort térmico apropiado, que se requiere de consideraciones que permitan una adecuada estancia al interior de recintos a modo de evitar el sobrecalentamiento producto de la energía absorbida y entregada por parte de los materiales, al igual que protecciones al exterior en espacios comunes y disposiciones óptimas de módulos fotovoltaicos para aprovechar tal recurso con énfasis en las horas que presentan cerca de 1000 W/m².

De forma similar a lo anterior, se busca aprovechar aquella radiación en días de invierno aportando al confort térmico interior a modo de ganancias solares. Para efectos de diseño de espacios comunes exteriores en cuanto al horario en que la presencia de sol se torna nociva y de acuerdo a un estudio realizado en Arequipa (clima árido frío o BWk), se relaciona un índice UV de verano 'alto' a partir de los 400 W/m² (tornándose muy alto a los 500 y extremo alrededor de 600), mientras que en invierno esta clasificación comienza a los 500 y se mantiene para valores superiores.

Radiación global horizontal promedio mensual (unidades en W/m2)

6:00	312	269	164	45	1	0	3	35	81	137	211	281
5:00	550	509	399	253	149	129	158	227	303	370	451	524
4:00	766	727	620	459	324	303	332	422	523	597	676	743
3:00	937	808	797	632	483	440	484	583	710	790	866	922
2:00	1040	1006	914	753	598	546	583	704	839	933	1004	1042
1:00	1076	1040	944	797	647	593	628	745	898	999	1073	1105
12:00	1038	1003	912	753	619	558	597	707	874	995	1070	1084
11:00	919	869	773	619	505	466	501	594	753	897	973	968
10:00	722	663	583	430	378	349	367	442	585	709	796	794
9:00	470	419	338	273	229	191	205	276	366	480	534	530
8:00	247	208	212	175	105	30	29	127	203	244	293	284
7:00	129	82	15	1	0	0	0	0	30	121	135	132
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

FIGURA 10

Gráfico de radiación global horizontal entre 7:00 y 18:00 hrs.

Para que ambas estrategias basadas en ventilación e inercia térmica funcionen de forma apropiada, se deben evitar las ganancias térmicas producto de la alta radiación en verano, mientras se acoge aquella recibida en invierno.

Fuente: Elaboración propia en base a datos otorgados por el Explorador Solar Chileno, 2019

Las primeras consideraciones para que una envolvente pueda funcionar de manera adecuada se relacionan tanto con la orientación y el diseño del edificio respecto a ello, como la ubicación y el dimensionamiento de vanos (Instituto de la Construcción, 2012). Es por esto y en función de utilizar la inercia térmica como elemento de control pasivo, que se requiere de consideraciones en cuanto a la trayectoria solar que vayan de la mano con el aporte térmico que se desee adquirir o evitar al interior de las unidades de acuerdo a la estacionalidad (figuras 11 y 12), y poniendo especial atención al periodo de mayor radiación incidente según lo expuesto con anterioridad y presente en los meses de octubre hasta marzo con ángulos solares que van desde los 62 a los 86° de elevación.

En el caso de conjunto de viviendas de mediana densidad se utiliza el ángulo de elevación solar de solsticio de invierno para asegurar la llegada de luz y radiación a los departamentos ubicados en primer nivel y a medio día (de acuerdo a las horas de mayor radiación para ser aprovechadas en tal estación), al poder verse enfrentados a otras viviendas en hilera con tal de condicionar un espacio común sombreado para verano.

Finalmente se propone la orientación del edificio como secundaria respecto a la trayectoria solar (la cual suele recomendarse norte en el hemisferio sur) a modo de facilitar una buena captación de las corrientes de aire como alternativa pasiva de enfriamiento en verano tanto para los usuarios como para las unidades en cuanto a estructura y fachada en términos de ventilación nocturna e inercia térmica, asegurando a su vez una adecuada ventilación para todos los recintos existentes del conjunto.

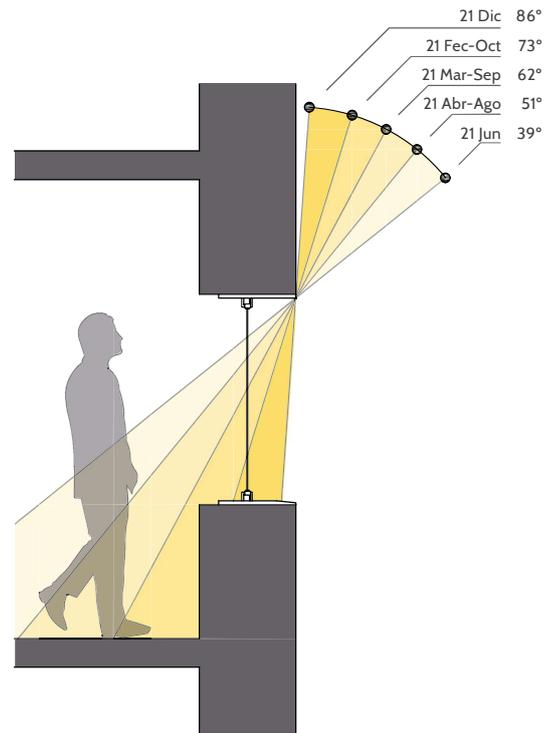


FIGURA 11
Ángulo solar incidente en interior

Se aprecia en imagen la dirección de incidencia que tomará la radiación para épocas calurosas con 86° de elevación máximos en solsticio de verano, y 39° de elevación mínimos durante el solsticio de invierno para el periodo frío. Para efectos esquemáticos y en relación al tema que se trabaja, se ocupa un vano de 1m de altura a 70cm del suelo junto con muros de inercia térmica con un espesor de 50cm. Utilizar vanos reducidos en cuanto a área facilita un control respecto a la temperatura en época de invierno. Se utilizan ángulos de elevación correspondientes al medio día, donde los valores de radiación aumentan para cada estacionalidad.

Fuente: Elaboración propia en base a carta solar de SunEarthTools, 2019

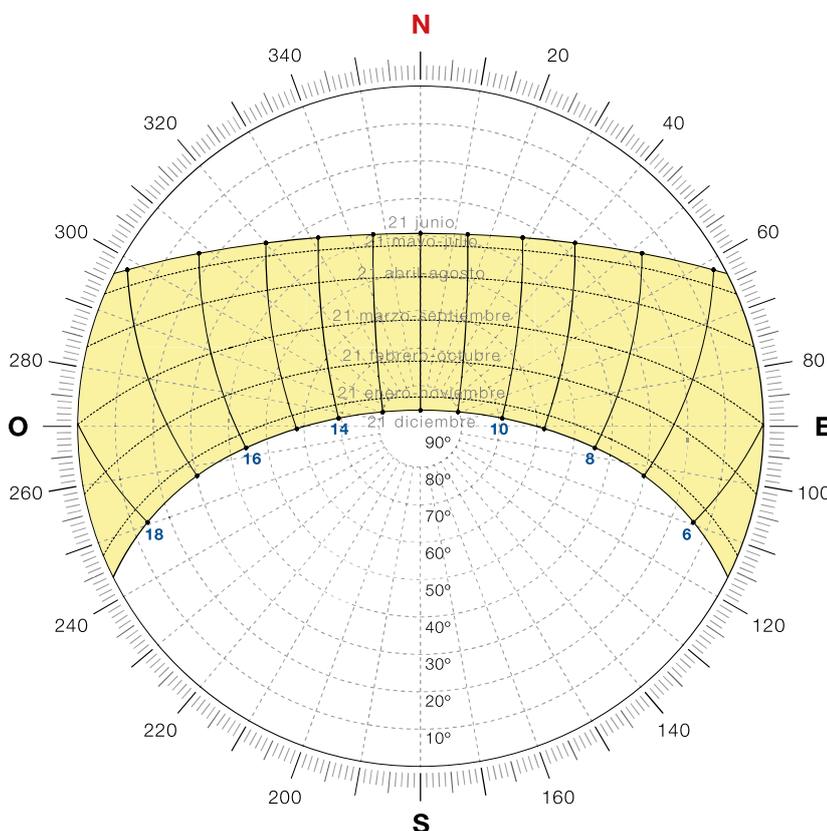


FIGURA 12
Carta solar de Copiapó

El área en amarillo representa el recorrido solar anual donde en línea horizontal se especifican ciertas fechas. Las líneas verticales corresponden a las distintas horas del día, mientras que las circulares segmentadas el ángulo de elevación solar.

Fuente: Elaboración propia en base a carta solar de SunEarthTools, 2019

Condiciones de viento y efectos sobre el confort térmico

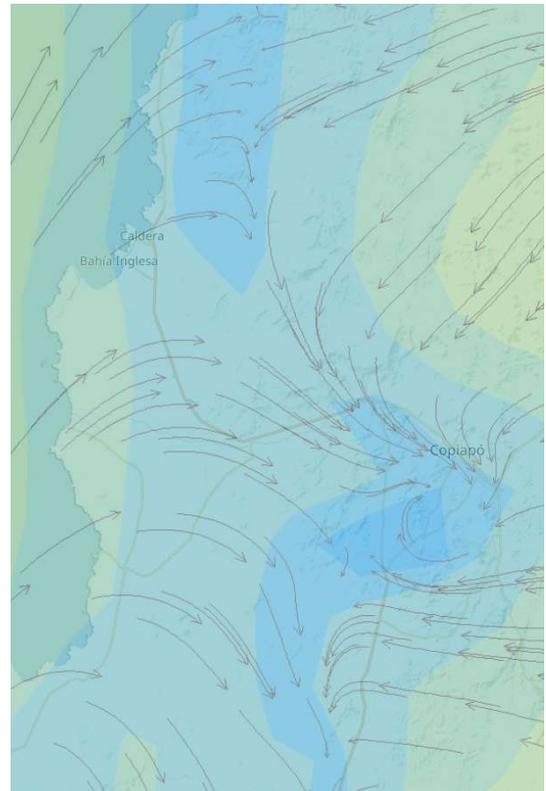
La importancia de la velocidad del aire radica en la sensación de confort que es capaz de brindar sobre el ser humano en lo que se conoce como *enfriamiento fisiológico* al incrementar las pérdidas de calor por convección y transpiración (León, 2017). En el primero, ocurre una transferencia de calor realizado desde la persona al flujo de aire en movimiento proveniente del exterior a menor temperatura, mientras que en el segundo, mayores velocidades de aire aumentan la tasa de transpiración de la piel al permitir una mayor eficacia en el proceso de evaporación que regula la temperatura interna de cada individuo (Ingersoll, Koenigsberger, Mayhew, y Szokolay, 1977).

Tales efectos se encuentran íntimamente ligados a la temperatura en que se encuentra el aire y su humedad relativa, a modo de atenuar o aumentar las pérdidas de calor por evaporación (Marchamalo, Rodrigo, Sanabria, Umaña, 2012).

El Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos elaborado por el Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC, 2012) de Chile, establece que debe existir una velocidad media mensual de viento sobre 2,5 m/s en aquellos meses donde se desea aplicar la estrategia, tomando en consideración la base meteorológica desde donde se toma la medición para efectos de humedad relativa; en este caso, los datos fueron recopilados de una base presente en la Universidad de Atacama, establecida en el sector norponiente de la ciudad.

Adicionalmente, León menciona que el efecto del aire sobre el cuerpo debe mantenerse solo hasta 2,5 m/s en recintos interiores, siendo aquel el límite en que el viento se transforma en una molestia por su velocidad.

FIGURAS 13 y 14
Condición geográfica de Copiapó y vientos en periodo cálido
Fuente: Imagen obtenida de Google Earth y Meteoblue, 2019



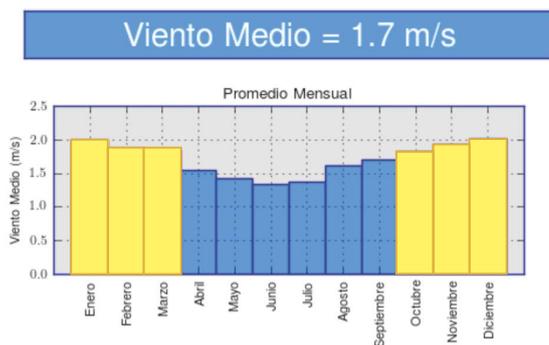


FIGURA 18
Viento medio anual en sector intermedio de Copayapu

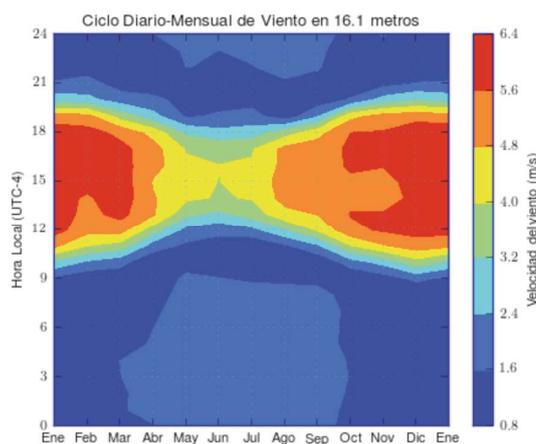
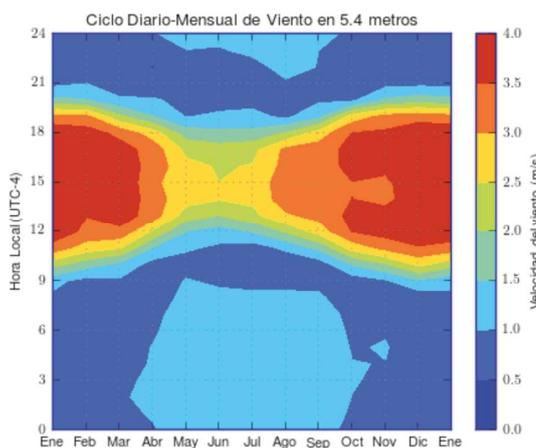
El valor de velocidad anual (1.7 m/s) difiere ligeramente con el promedio entre los meses que presentan una temperatura por sobre la de confort (1.9 m/s) ligado a altas temperaturas (de octubre a marzo).

Fuente: Imagen obtenida de Explorador Eólico, 2019

Teniendo ello en mente y a fin de conocer cuáles son aquellos sectores que presentan condiciones de aire favorable en cuanto a velocidad media mensual definida por el CITEC como 2.5 m/s, se obtienen los datos —a través del Explorador Eólico— correspondientes a las zonas en que existiría una futura expansión urbana de acuerdo a Carrasco (2010), señaladas en la figura 9 y en donde se promedian las velocidades pertenecientes a los meses cálidos de primavera y verano (octubre a marzo) a alturas que bordean los 5 y 15m. Los distintos colores representan los usos asociados definidos por el Plan Regulador Comunal vigente de la ciudad en 2002, donde Carrasco nuevamente argumenta que aquellos destinados a explotación agrícola y uso industrial exclusivo podrían mutar para formar parte del crecimiento urbano en cuanto a vivienda al ser más susceptibles de edificar y encontrarse cercanos a la cobertura de redes urbanas y sanitarias.

Se toma así como caso de ejemplo el sector perteneciente a Copayapu, ubicado al sur de la ciudad, que cuenta con una velocidad media —entre los meses de mayor temperatura— de 1.9 m/s a 5.4m de altura (figura 18), constituyendo uno de los sectores con mayor área potencial de desarrollo inmobiliario en los próximos años de acuerdo Carrasco. Para efectos de diseño en este estudio se considerará la velocidad de viento ubicada al centro de aquella área, cuyos límites norte y sur presentan una ligera variación media anual de una décima en cuanto a velocidad.

Finalmente, se toman en consideración las velocidades medias mensuales a distintas alturas (de 5.4 y 16.1m de acuerdo a los datos entregados por el Explorador Eólico, representado en las figuras 19 y 20), y a distintas horas del día, donde se observan valores superiores a 2.5 m/s, lo que podría presentar un desafío para llevar a cabo una adecuada ventilación interior según el estudio presentado por León.



FIGURAS 19 Y 20
Velocidad media de viento mensual por hora a distinta altura

Existen valores que superan los 2.5 m/s mínimos recomendados por el CITEC durante la tarde en meses cálidos. Aquello presenta un desafío para ventilar con una velocidad que no genere molestias

Fuente: Imágenes obtenidas de Explorador Eólico, 2019

Junto a la velocidad del aire y otros factores definidos por la *Sociedad Americana de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado* (ASHRAE por sus siglas en inglés, y en 2017) tales como la temperatura del aire, la temperatura radiante media, tasa metabólica, y cantidad de ropa; la humedad relativa juega un rol clave en el confort térmico de las personas. De acuerdo a la misma entidad, encargada de especificar aquellos factores tanto ambientales como personales que inciden en la condición térmica de espacios interiores, la humedad relativa —entendida como la cantidad de vapor de agua presente en el aire en relación a su máximo según condiciones de temperatura y presión (RAE, 2019)— debe mantenerse en un rango interior que no sobrepase el 65% para evitar el crecimiento de microorganismos (ASHRAE, Estándar 62.1, 2016). El estándar no especifica un mínimo, pero se recomienda un valor cercano al 30% (Gilmore, 1972) para evitar problemas respiratorios y molestias asociadas a la sequedad; ello, teniendo en mente la temperatura exterior para no crear eventos de condensación en ventanas.

De manera natural, se puede apreciar que la humedad relativa media en el ambiente de Copiapó se encuentra dentro de tales rangos (figura 22); situación que afecta el confort en relación a la velocidad de viento.

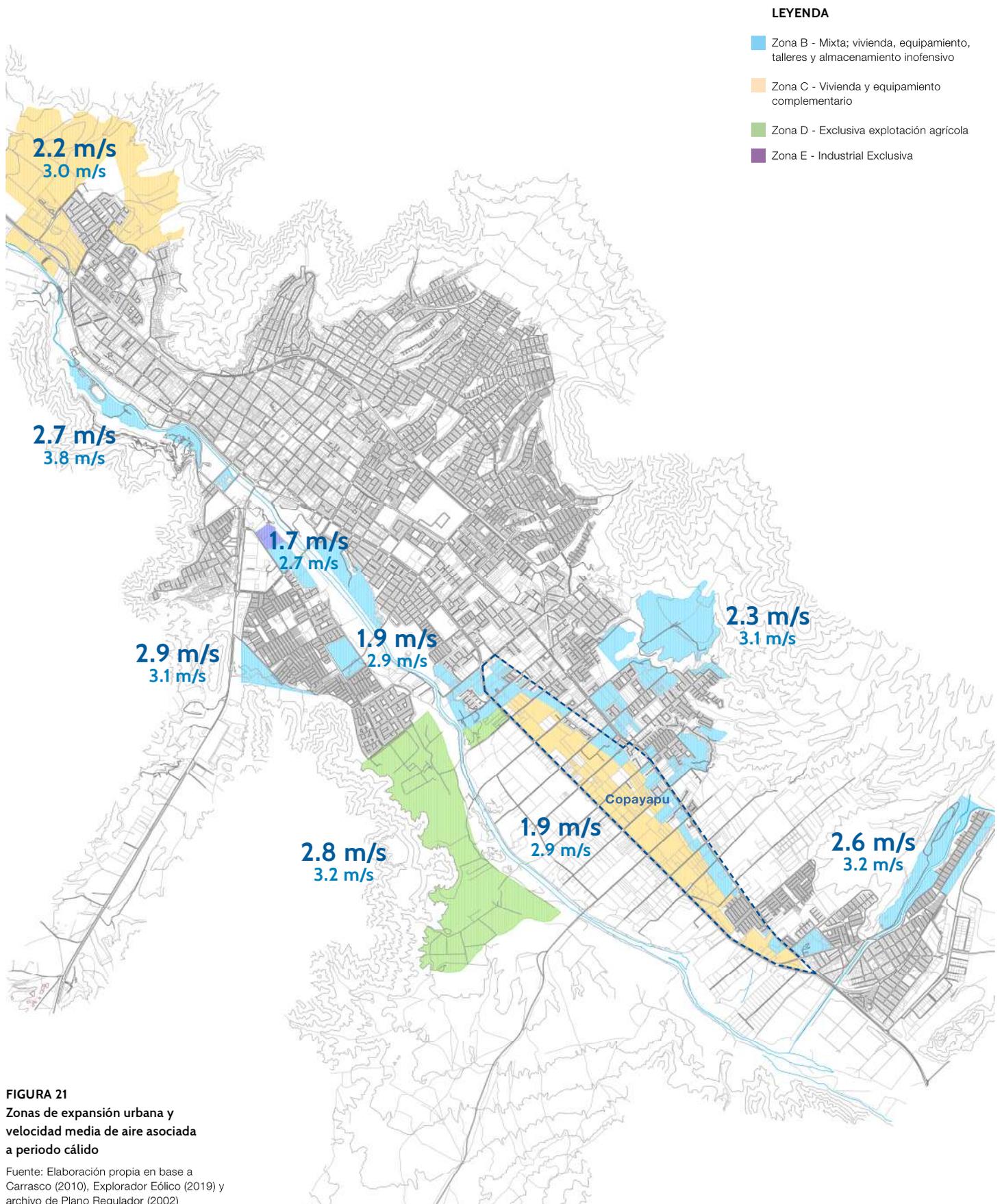


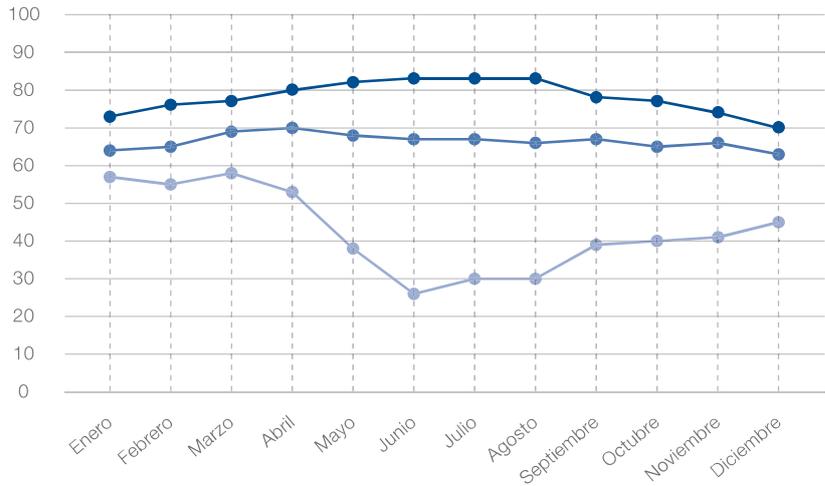
FIGURA 22

Humedad relativa media mensual en Copiapó

Se promediaron los datos disponibles desde 2017 a la fecha proporcionados por la estación de la Universidad de Atacama ubicada en la ciudad de Copiapó. Datos proporcionados en las cercanías del aeropuerto (y por ende la costa), suelen poseer valores más elevados de humedad relativa.

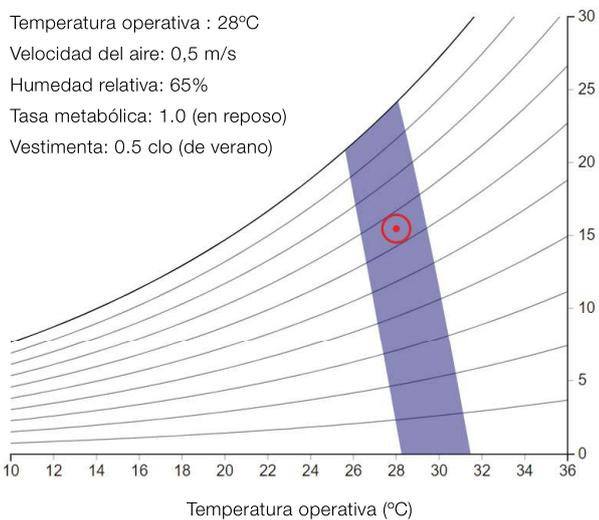
Los valores específicos pueden encontrarse en la Tabla 2 de Anexos

Fuente: Gráfico de elaboración propia en base a datos anuales promediados de la Dirección Meteorológica de Chile

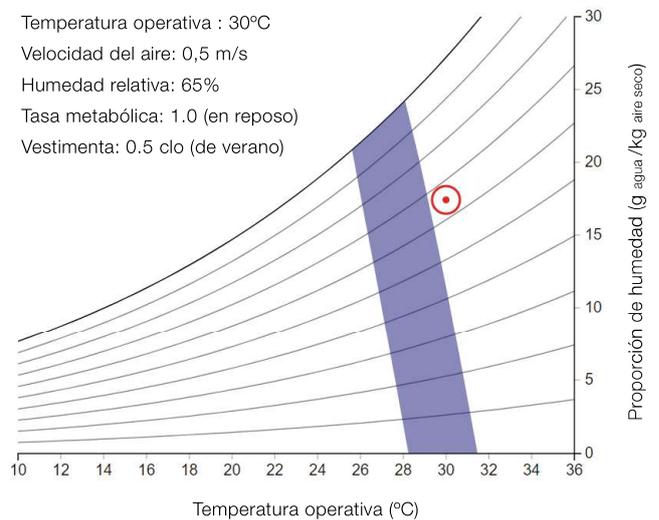


Para alcanzar el confort, generalmente se requiere de menor humedad relativa a mayores temperaturas, siendo el periodo frío menos exigente en lo que respecta a mayores valores de humedad. Para ejemplificar aquello, se presenta un caso hipotético utilizando la herramienta de Confort Térmico perteneciente al *Centro para el Entorno Construido* (o CBE por sus siglas en inglés, el cual utiliza diagramas psicrométricos a través de parámetros establecidos por el estándar ASHRAE 55-2017. El sistema emplea además la Opinión Media Estimada (Predicted Mean Vote o PMV) el cual considera la respuesta media de un gran número de personas de acuerdo a una escala térmica.

Temperatura operativa : 28°C
 Velocidad del aire: 0,5 m/s
 Humedad relativa: 65%
 Tasa metabólica: 1.0 (en reposo)
 Vestimenta: 0.5 clo (de verano)



Temperatura operativa : 30°C
 Velocidad del aire: 0,5 m/s
 Humedad relativa: 65%
 Tasa metabólica: 1.0 (en reposo)
 Vestimenta: 0.5 clo (de verano)



FIGURAS 23 y 24

Diagramas psicrométricos para caso hipotético

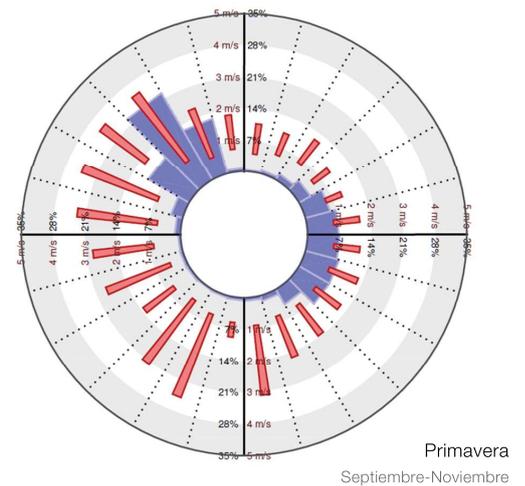
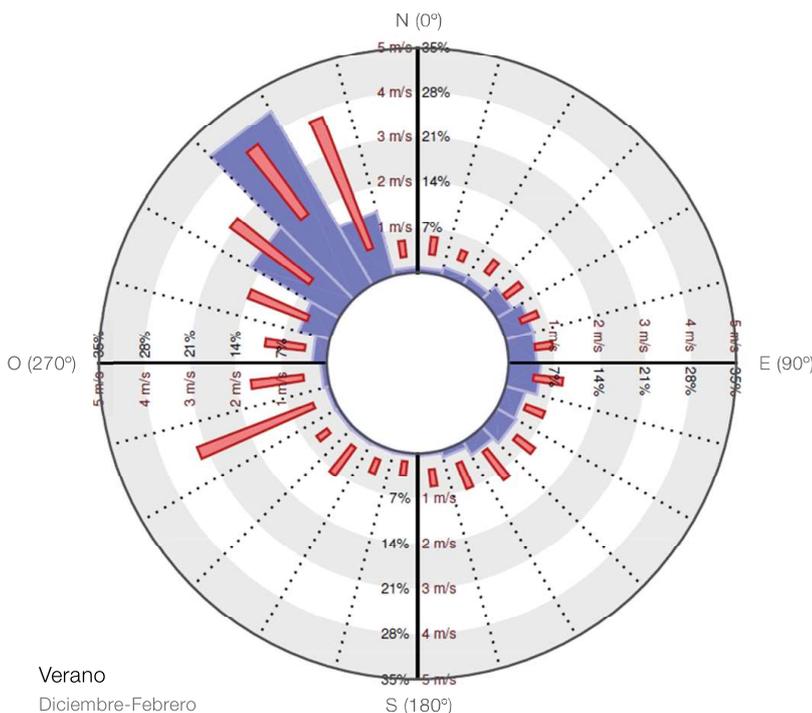
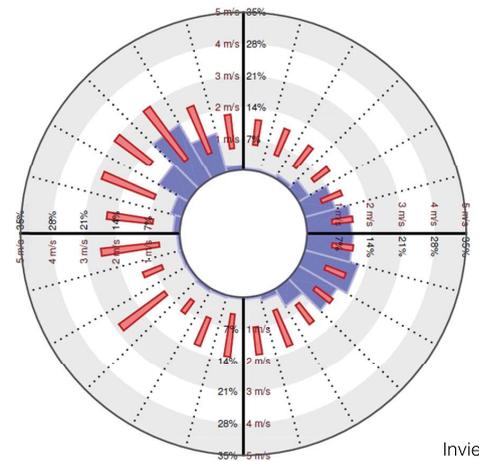
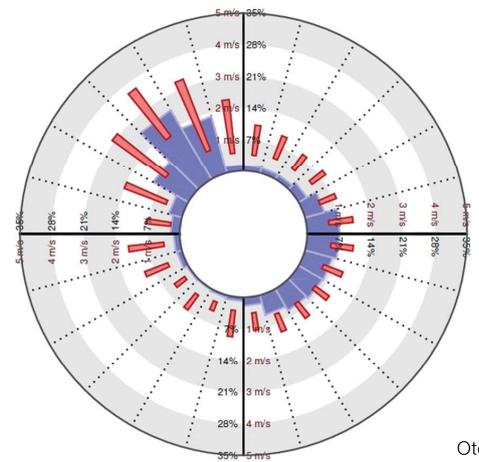
Utilizando la herramienta disponible por el CBE, se ejemplifica el efecto de la ventilación en relación a su velocidad y humedad relativa

Fuente: Gráfico obtenidos de comfort.cbe.berkeley.edu

En el primer caso (figura 23) —donde el punto rojo representa las condiciones térmicas en que se encuentra una persona y la zona azul el rango de confort— se tiene que los factores que influyen en la comodidad actúan de manera favorable para una temperatura operativa interior (promedio entre las temperaturas superficiales y del aire) de 28°C, una velocidad de viento de 0,5 m/s, una humedad relativa del 65%, tasa metabólica de reposo y vestimenta de verano. Si todas las condiciones permanecen inalteradas salvo por la temperatura operativa, que en el segundo caso

asciende a 30°C (figura 24), es probable que la persona experimente una falta de confort. Para remediarlo, bastaría con llevar el viento a una velocidad de 1 m/s, lo que en diagrama se traduce a una zona de confort (azul) desplazada hacia la derecha. La cantidad de humedad como se menciona anteriormente dificulta alcanzar el estado de confort a altas temperaturas, por lo que a mayor grado de humedad se necesita de una mayor velocidad de viento. Para ponerlo en perspectiva, el segundo caso puede ser resuelto manteniendo la misma velocidad de 0,5 m/s pero deshumidificando el ambiente hasta un 40% (descenso vertical del punto rojo). Factores como la tasa metabólica y el tipo de vestimenta influyen en verano de acuerdo al tipo de actividad que se esté realizando y la cantidad de ropa que se lleve puesta. Así, actividades más intensas que aumenten el rango metabólico (como llevar a cabo tareas domésticas) y una mayor cantidad de ropa desplazarán la zona de confort hacia la izquierda en diagrama, lo que nuevamente se traduce en mayores requerimientos de velocidad de viento que ayuden a compensar tal efecto.

Una vez se advierte el efecto que el viento puede causar sobre el confort de las personas queda conocer su dirección de procedencia para poder emplearlo (o bien evitarlo cuando perjudica el confort) de forma efectiva en el lugar de emplazamiento. Para ello, se utiliza nuevamente la información otorgada por el Explorador Eólico a 5 metros de altura (figuras 25 y 26, en donde las barras azules indican el porcentaje horario y las rojas el rango de velocidad) para el sector de Copayapu en cada estación del año. En ella se observan vientos predominantes del noroeste para el periodo cálido de verano-primavera y de manera similar al otoño, mientras que en invierno estos provienen del sureste. Así, existe una clara dirección de flujo que puede ser aprovechada en verano y evitarse en invierno a través de protecciones que permitan aquella primera acción.



FIGURAS 25 (izquierda) y 26

Rosas de velocidad de viento para cada estación del año

Se observan vientos anuales predominantes del noroeste y secundarios del sureste. Las mediciones corresponden al sector intermedio de Copayapu señalado anteriormente

Fuente: Imágenes obtenidas de Informe de Viento, perteneciente al Explorador Eólico, 2019.



Condiciones de suelo y posibilidad de uso como elemento constructivo

Junto al aire y en múltiples lugares de carácter árido y cálido, la tierra se ha convertido en un material de disponibilidad local capaz de hacer frente a la gran amplitud térmica por medios pasivos regulando el clima interior —en términos de temperatura y humedad— a través de sus propiedades.

Distintas culturas a lo largo de la historia han utilizado este recurso en respuesta al entorno seco tales como las de China, Irán, y Egipto, en donde el uso de la tierra adquiere múltiples dimensiones bajo técnicas empleadas de acuerdo a la composición de suelo sobre el que se fundan (Minke, 2009) y en un recorrido que antiguamente favoreció su temprano desarrollo hasta el continente europeo.

El contexto chileno no ha sido diferente, observando el uso de la tierra cruda (entendida como tierra en su estado natural carente de compuestos orgánicos) como material de construcción desde la época precolombina en un proceso extendido por toda Latinoamérica que posteriormente incorporó los adelantos de la tradición ibérica durante el periodo colonial con fines militares, a lo cual se añadieron ciertas diferencias regionales siendo el adobe (masa de barro y paja en forma de ladrillo), la quincha (estructura de caña y barro), y el tapial (o tierra apisonada), las tecnologías más frecuentes en ese entonces (figura 27).

Gran parte de la construcción en tierra sin embargo y durante el siglo XX, llegó a asociarse a conceptos de pobreza y atraso en una sociedad de consumo que otorgó prestigio a materiales de mayor costo energético y menor respuesta ambiental en función de la apariencia. Es debido a esto que en la actualidad se ha revalorizado el uso de la tierra como material constructivo desde diversos puntos de vista: estético, ambiental, y económico enfocado tanto en la producción, como en el transporte y el costo asociado al confort térmico a largo plazo (Bulo, Lacoste, Premat, 2013), en una ejecución formal que adecua el principio de tales técnicas a las tecnologías actuales (figura 28).

De manera complementaria, se argumenta la recuperación en el uso de este material desde el sentido cultural reflejando las necesidades de una región cuya imagen se ha visto fuertemente ligada al desierto.

Para construir en tierra, primero debe entenderse a qué nos referimos como tal; de acuerdo a Gernot Minke, arquitecto referente en materia de construcción sustentable, la tierra en tanto material de construcción hace referencia a una mezcla de arcilla, limo (arena muy fina), y arena, en donde pueden existir agregados tales como gravilla o piedras de tamaño reducido (2009).

FIGURAS 27 (superior) y 28 (inferior)

Técnicas originales de construcción en tierra y técnicas llevadas a la actualidad

Las mismas técnicas referentes al adobe, la quincha, y el tapial, empleadas en el periodo colonial del territorio chileno, han sido perfeccionadas con tal de satisfacer tanto exigencias constructivas (térmicas y sísmicas entre las más importantes) como estéticas de hoy en día.

Referencias: **a.** Casa de adobe y paja en Chiu Chiu, **b.** Vivienda de quincha de puyas en Illapel, **c.** Muro de tapial en Putaendo, **d.** Casa de barro contemporánea en Atacama, **e.** Casa Munita González en Santiago construida en sistema de malla metálica y perfiles de acero, **f.** Hotel Atacama en tapiales de adobe.

Fuente: Imágenes obtenidas de Codoceo (2013), Lobos (2017), Aranda et al. (2012), Pacheco (2017), ArchDaily (2013), y Plataforma Arquitectura (2009).

De manera más precisa, la ingeniería otorga nombres de acuerdo al diámetro que poseen estas partículas: menores a 0.002 mm corresponde a arcilla, entre 0.002 y 0.06 mm se considera limo, y desde 0.06 a 2 mm es llamado arena. Elementos mayores a este último se definen como gravilla o piedras.

Al igual que el concreto, las partículas de arcilla actúan como aglutinante en presencia de agua mientras que el limo, la arena y otros agregados forman parte del relleno que estructura el compuesto. Dependiendo de la proporción de estos elementos es que se habla de un suelo arcilloso, limoso, o arenoso.

Para efectos de estudio y según la información disponible y actual en cuanto a aspectos geográficos, se asemeja la composición de suelo en Copiapó a sectores en donde se llevó a cabo una investigación a través de muestras recolectadas en el desierto de Atacama a una profundidad de 10 cm (identificadas como AC: Aguas Calientes, AL: Altamira, y CH: Chañaral, figura 29). Tales muestras se obtuvieron de unidades geomorfológicas de naturaleza climática idéntica presentes en las cercanías de la ciudad, sector cuya unidad deriva de la sedimentación de estas dos últimas por corrientes de agua. Para los tres suelos se obtuvo un porcentaje respectivo de arena, limo, y arcilla en AC: 87-5-8, AL: 93-5-2, y CH: 83-15-2. Como se puede apreciar, el sector de Atacama presenta suelos cuya proporción de arena tiende a ser alta y baja en arcilla en lo que se denomina suelo arenoso o simplemente arena de acuerdo a la clasificación posterior a Voth en 1978 (figura 30 como sandy loam y sand respectivamente).

Aunque no existe una clara recomendación sobre el rango de partículas a utilizar debido a las múltiples características de suelo en todo el mundo, es sabido que las técnicas de construcción, tales como el adobe, la tierra comprimida en bloques, y la tierra apisonada, utilizan una mayor proporción de arena y grava (40 a 80%), convirtiendo este tipo de suelo en uno de los más favorables para la construcción en tierra cruda (Danso, 2018, área café en figura 30). Sin embargo, el porcentaje presente en la zona tampoco refleja la distribución óptima al ser en su mayoría arena, por lo que debe estabilizarse con una mayor cantidad de limo y arcilla mediante técnicas de pulverizado y escurrimiento. La arcilla a su vez puede agregarse en forma pura y comercial en polvo a la mezcla húmeda como una mejor alternativa a estabilizar con cemento, ya que este último que contiene una mayor cantidad de energía incorporada y emisiones de CO₂.

A partir de lo anterior y según la cantidad de áridos disponibles en terreno —material que puede extraerse de la misma excavación para fundaciones o estacionamientos según Minke— la técnica más adecuada corresponde a la de tapial o comúnmente llamada tierra o barro apisonado.

Al tener un porcentaje elevado de arena (con una cantidad que va desde el 50 al 75% del total de la mezcla según Maniatidis y Walker en 2003 y de acuerdo al tipo de suelo), la tierra apisonada posee ciertas ventajas sobre otras técnicas constructivas como el adobe; estas corresponden a un menor índice de encogimiento por humedad (lo que previene grietas), una elevada resistencia tanto a la erosión como a los sismos, y una apariencia final natural cautivadora si se ejecuta de manera adecuada, sin la necesidad de contar con acabados (figura 31).

Además de estas ventajas, construir en tierra ya posee otras sobre otros materiales industriales tales como el concreto y el acero, que

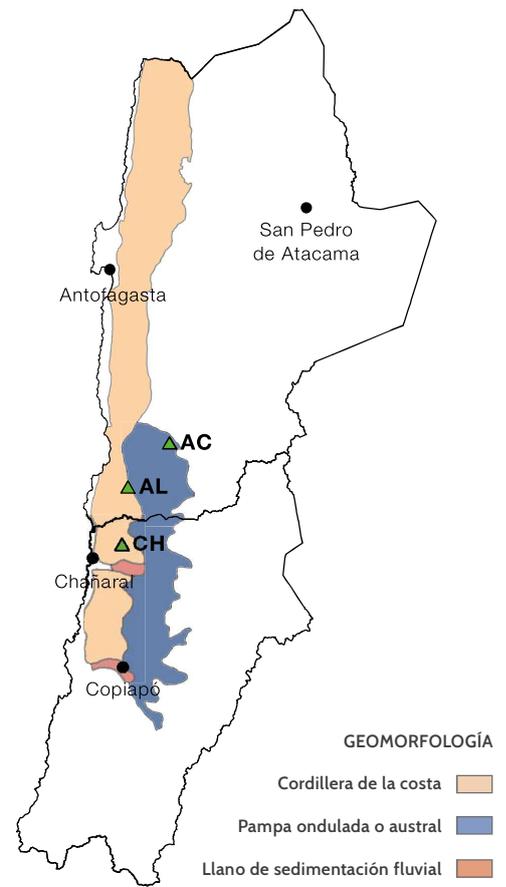


FIGURA 29
Geomorfología en regiones de Antofagasta - Atacama y composición de suelo en cuanto a partículas según estudio

Fuente: Imagen de elaboración propia en base a Börgel (1983) y Barnum et al. (2013).

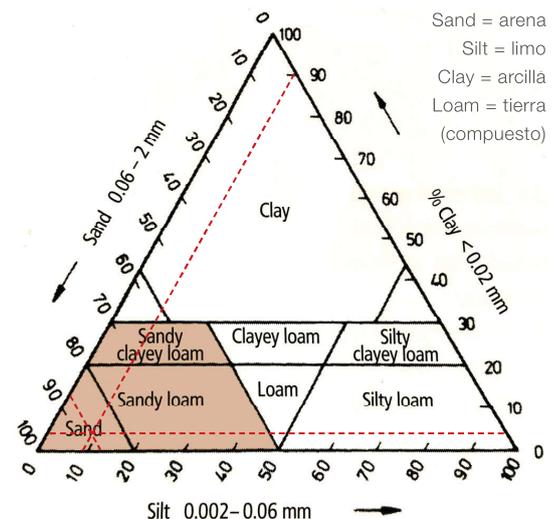


FIGURA 30
Tipo de suelo según granulometría en porcentajes

Se obtiene un tipo de suelo 'arenoso' como promedio de las muestras cuya distribución de partículas se muestra en rojo

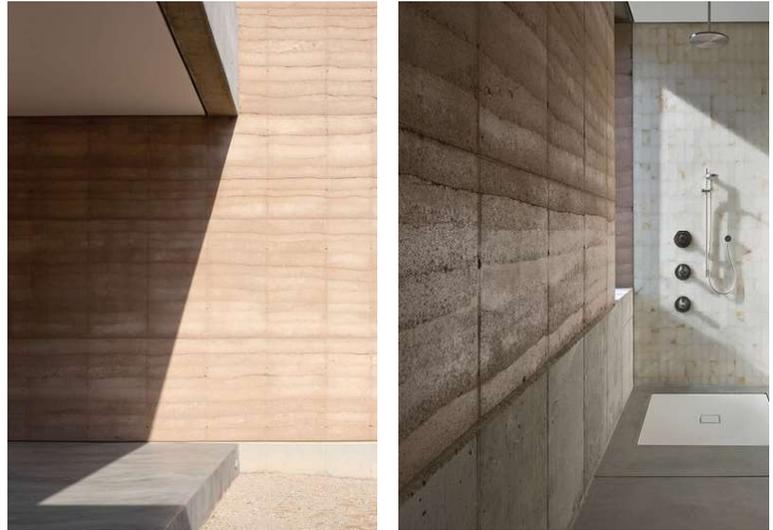
Fuente: Imagen obtenida de Minke (2009)

FIGURA 31

Apariencia exterior e interior en muros de tierra apisonada en desierto. Tucson Mountain Retreat, Arizona, Estados Unidos. DUST architects, 2012.

Resulta frecuente observar construcciones contemporáneas elaboradas a partir de esta técnica en zonas desérticas norteamericanas al contar con material de disponibilidad local y gran inercia térmica. La falta de conocimiento respecto a las ventajas y manejo que esta técnica requiere ha constituido el principal impedimento para implementarla en Chile.

Fuente: Imágenes obtenidas de Timmerman y Archi Expo, 2020.



resultan apropiadas para un clima de gran amplitud térmica. Entre las condiciones de confort y el ahorro energético asociado, la tierra es capaz de balancear la humedad ambiente al interior de recintos en un proceso de absorción donde el material alcanza un equilibrio de aquel contenido.

Por otro lado, y al igual que otros materiales pesados, la tierra puede almacenar calor a lo largo del día para devolverlo lentamente durante la noche creando un 'retraso', aludiendo a la manera en que un muro actúa sobre las temperaturas exteriores antes de alcanzar el interior. Como resultado, muros de gran capacidad térmica forman un retraso respecto a la temperatura exterior manteniendo los espacios interiores frescos durante el día y templados en la noche como se muestra en la figura 32, donde se comparan las temperaturas interiores a lo largo del día de una obra construida en muros de adobe (50 cm) y otra en concreto prefabricado (10 cm) en condiciones volumétricas idénticas insertas en el clima desértico de El Cairo, Egipto (Fathy, 1986).

De esta forma y al igual que señala Minke (2009), tal característica se vuelve esencial para climas de gran amplitud térmica (días cálidos y noches frías) donde la temperatura se encuentra normalmente dentro del rango de confort (18 a 27°C), al igual que sucede con la ciudad de Copiapó.

Finalmente, se encuentran los beneficios ligados al medio ambiente si la ejecución se lleva a cabo de manera correcta: reducción de emisiones y ahorro de energía por parte de fabricación, transporte, y manejo del material en sitio en comparación al ladrillo cocido o concreto. A esto se suma la posibilidad de reutilizar el material una vez el edificio haya cumplido su función y otorgar puestos de trabajo para una tarea que no requiere de gran capacitación.

Consideraciones del material y la técnica del tapial

Construir en tierra a diferencia de otros materiales posee ciertas apreciaciones; en primera instancia, se debe contar con pruebas de laboratorio a modo de optar por la proporción de partículas adecuada según una serie de ensayos que ponen a prueba la consistencia y adhesión del material, determinando la fuerza de compresión, resistencia a la abrasión y al agua

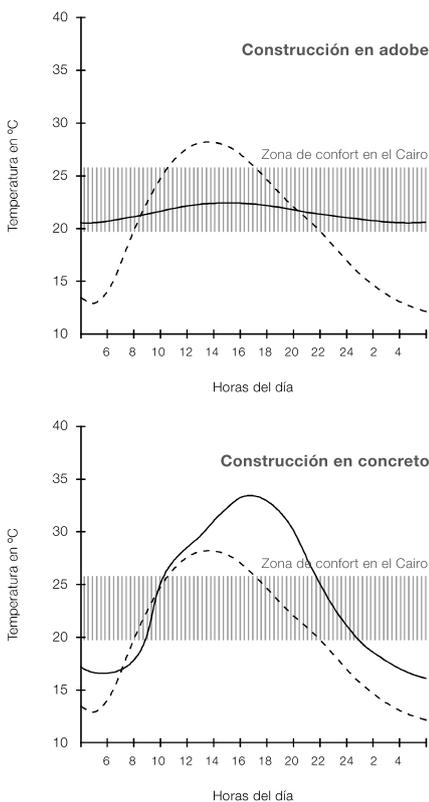


FIGURA 32

Retraso o desfase de temperatura interior y exterior en dos construcciones de El Cairo elaboradas en adobe y concreto

La línea continua representa la temperatura interior mientras que la segmentada la exterior, equivalente para ambos casos.

Fuente: Imagen elaborada a partir de Fathy, 1986

entre las más importantes. Como alcance y para efectos de esta investigación solo se cuenta con nociones generales de acuerdo a la distribución de partículas de suelo en porcentajes establecido con anterioridad para la zona.

Para este tipo de suelo considerado arenoso, la transmitancia térmica (o valor U) utilizada en Chile para regular el comportamiento térmico de las viviendas a través de la envolvente, se puede calcular para el material a partir de la conductividad térmica k (expresada en W/mK o watt/metro Kelvin), la cual se encuentra definida a su vez por el peso específico del material de acuerdo al Instituto Alemán de Normalización o DIN por sus siglas nativas, figura 33). El peso específico se puede obtener a partir de un estudio sobre tipos de suelo realizado por Danso en 2018 que guarda relación con las técnicas de tierra recomendadas para la construcción, donde se tiene que para una mezcla de 73% de arena fina (categoría en que entra Copiapó con 0.4 mm de diámetro promedio según Camaño y Fariña, 2012), 23% limo, y 4% arcilla en tierra apisonada, el peso específico del compuesto en estado seco es de 1980 kg/m³, lo cual siguiendo la tabla presentada por el Instituto Alemán se estima en un valor k de 1.2 W/mK. Tal valor suele decrecer en la medida que el porcentaje de arcilla y limo aumentan, sin embargo, para este caso se considerará una proporción de 70-30 entre arena y limo/arcilla como lo recomiendan algunos autores entre 1986 y 1996 de acuerdo a Maniatidis y Walker (2003).

Una vez obtenida la conductividad se puede calcular la resistencia total del material utilizando la fórmula $R_t = R_{si} + R + R_{se}$, donde R equivale al espesor del material (en metros) dividido por su conductividad mientras que R_{si} y R_{se} a las resistencias térmicas superficiales interior y exterior. Para un muro de 60 cm, la resistencia es de 0,5 m²K/W, siendo la resistencia total de 0,67 m²K/W con $R_{si} + R_{se} = 0,17$. De esta manera nos queda que siendo $U = 1/R_t$, la transmitancia térmica es de 1,49 W/m²K. A modo de comparación, el valor U de un muro de hormigón armado de 15 cm usualmente utilizado en muros exteriores de departamento y con una densidad igual a 2400 kg/m³, resulta ser de 3,84 W/m²K. Una mayor transmitancia significa una mayor pérdida de calor a través del material y por ende una menor capacidad aislante.

Aunque el valor de ambos casos anteriores se encuentre dentro de la exigencia térmica establecida en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones en Chile desde 2007 con un valor U de 4,0 W/m²K para muros en el sector de Copiapó (zona 1), esto podría resultar insuficiente para noches en que la temperatura desciende considerablemente. Esto se debe a que la reglamentación térmica utiliza como referencia los **grados día de calefacción anuales** basados en la temperatura media de los días en el mes (Bustamante, 2009), encontrándose Copiapó en tales términos usualmente en un rango de confort debido al promedio entre ambos extremos. A modo de comparación, la envolvente exterior en edificios de departamento actual suele construirse en muros de hormigón (15 cm) acompañados de poliestireno expandido (4 cm) y una placa de yeso cartón (1 cm) con un valor U total de 0.81 W/m²K.

Para alcanzar un valor de transmitancia térmica similar, puede utilizarse un sistema constructivo que incorpora poliestireno extruido al interior del muro (figura 34) y así evitar una mayor pérdida de calor en días fríos (para alcanzar el valor U de comparación basta con paneles de 2.5 cm de espesor en un muro total de 60 cm). Tal necesidad sin embargo debe anteponerse a alternativas de diseño que permitan contar con ganancias

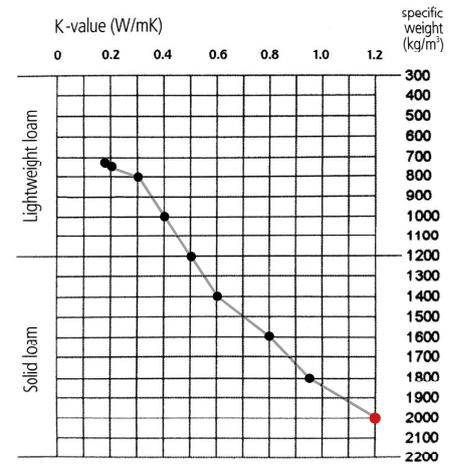


FIGURA 33
Valor de conductividad térmica según peso específico

Para la composición de tierra más cercana estudiada, el valor k de conductividad corresponde a 1.2 W/mK, siendo aquel material de composición menos densa el de menor conductividad, usualmente asociado a adobes (mezclas de barro y paja)

Fuente: Imagen intervenida a partir de la norma alemana DIN 4108-4, 1998.

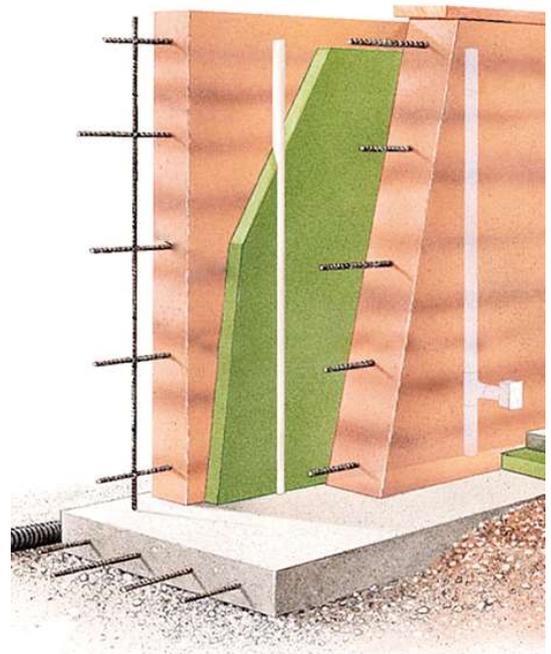


FIGURA 34
Tierra apisonada estructural aislada

El sistema comprende paneles de poliestireno extruido al interior donde se colocan tubos de instalación para el cableado eléctrico.

Fuente: Imagen obtenida de Sirewall, 2019



FIGURA 35
Vigas superiores de unión, sede del American AGCredit, Santa Rosa, California

Es común contar con vigas de concreto, acero o madera para unir la estructura o dar paso a otro nivel. En el caso del concreto, se vierte la mezcla sobre el tapial nivelado, pudiéndose demarcar con un biselado para efectos estéticos.

Fuente: Imagen obtenida de TLCD Architecture, 2014

solares directas en invierno al tratarse de un lugar en el que el costo de instalación puede sobrepasar al de calefacción, tratándose además de un lugar que presenta condiciones ideales para obtener energía eléctrica a través del sol.

Al tratarse de un país sísmico, se recomienda que el sistema de muros apisonados vaya acompañado de una estructura rígida de pilares y vigas junto con refuerzos en acero capaces de garantizar la integridad y seguridad del edificio. A su vez, la tierra debe cumplir con una fuerza compresiva mínima de 800 psi (*pounds per square inch* o libras por pulgada cuadrada) lo que equivale a cerca de 56.3 kg/cm^2 , de acuerdo a las pautas del *Código Uniforme de Construcción* (o Uniform Building Code) en Estados Unidos; esto, para que la tierra pueda desarrollar una sujeción al acero (Easton, 2007). Según los datos presentados por Minke (2009), se puede estimar que un compuesto seco de tierra cuyo peso específico es cercano a los 2000 kg/m^3 , resulta en una fuerza compresiva de 33 kg/cm^2 o 470 psi. Esto se resuelve al estabilizar la tierra con alrededor de un 6% de cemento del volumen total (Dulal, 2015).

Las limitaciones respecto a la cantidad de pisos que pueden construirse en tierra son tanto estructurales como económicas. En lugares sísmicos, esto se traduce a un mayor costo de refuerzo mientras más alto el muro al encontrarse sometidos a grandes esfuerzos. En estos casos, es preferible contar con vigas de unión de concreto cada uno o dos niveles que sujeten la estructura y brinden apoyo para el moldaje del apisonado de ser necesario (figura 35).

Para otros aspectos constructivos referidos a muros en tierra apisonada en zona sísmica y de acuerdo a Minke, para construcciones de más de un nivel se debe contar con fundaciones a un mismo nivel en todo el conjunto y en lo posible una distribución de muros simétrica y compacta. Juntas de esquina y aberturas tanto para ventanas como puertas deben rigidizarse a través de pilares de madera o concreto para evitar el quiebre producido por las fuerzas horizontales. Estas mismas aberturas deben controlarse en cuanto a proporción para no desestabilizar el muro y encontrarse unidas por un dintel que abarque el muro completo (figura 36). Se recomienda a su vez utilizar una mezcla ligera para secciones bajo ventanas, o bien utilizar un sistema flexible que asemeje las propiedades de una estructura en caña o bambú cubierta en adobe.

Es importante recordar que pese a las alternativas constructivas y de diseño hacia un comportamiento favorable respecto a sismos, prima la correcta mezcla de partículas y ejecución de muros antecedida por pruebas de laboratorio capaces de asegurar una buena cohesión y resistencia por parte del material.

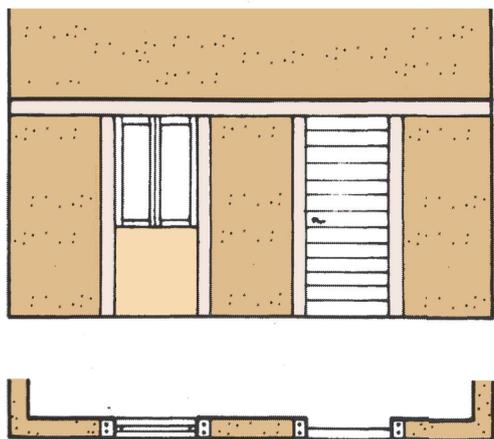


FIGURA 36
Mejor alternativa de construcción en tierra para vanos de acuerdo a Minke (2009).

Para ventanas, el ancho no debiese superar 1.2 m de distancia ni más de $1/3$ del largo total del muro. El largo de muros entre vanos por otro lado, debe ser al menos $1/3$ de su altura y no menores a 1 m.

Fuente: Imagen intervenida de Building With Earth de Gernot Minke, 2009.

Ventilación e inercia térmica en conjunto: enfriamiento nocturno

La inercia térmica como recurso utilizado en arquitectura bioclimática se basa en la capacidad de ciertos elementos para almacenar energía en forma de calor y liberarlo de manera lenta, aminorando así el uso de sistemas mecánicos tanto de calefacción como de enfriamiento para lograr el confort térmico interior. Esta capacidad depende de las propiedades del material y en mayor medida de su calor específico, el cual relaciona la cantidad de calor necesario que un cuerpo requiere por kilogramo para que su temperatura se eleve en un Kelvin (o grado Celsius), en la expresión $c = J/KgK$ (calor específico = Joule/kilógramo Kelvin). Por ello, mientras más alto el calor específico de un cuerpo (o capacidad para almacenar calor), mayor es la cantidad de energía necesaria para elevar su temperatura en un grado. Esto ocurre frecuentemente para cuerpos de mayor masa, cuya capacidad térmica, y por ello inercia, es elevada. Sánchez (2015) agrega que un material de mayor conductividad térmica (expresado en W/mK) dentro de parámetros moderados, colabora en el aumento de esta inercia, siendo la tierra apisonada de origen arenoso, una de las mejores alternativas según lo expresado en un comienzo. A modo de referencia, el calor específico de la tierra apisonada en estado seco con una densidad cercana a los 2000 kg/m^3 es de 837 J/KgK , mientras que el hormigón —material de apoyo en cuanto a estructura en país sísmico— posee una capacidad un tanto mayor de 920 J/KgK al poseer mayor densidad (de 2240 kg/m^3), lo que en términos de compatibilidad resulta favorable (Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción, 2012).

La capacidad de acumular calor permite atenuar las fluctuaciones de temperatura entre interior y exterior generando un desfase y así estabilizando la temperatura al interior de los edificios, constituyendo una alternativa fundamental para zonas climáticas en que la diferencia de temperatura a lo largo de un mismo día es considerable. Este calor acumulado durante el día y en verano sin embargo, debe contar con un medio efectivo para disipar tal energía durante la noche; esto se consigue a través de una ventilación adecuada que permita retomar el ciclo al día siguiente (figura 37). Deben implementarse también medidas para evitar la acumulación de energía en estaciones donde no se requiera a través de protecciones solares o bien teniendo en cuenta la distribución y posición de vanos.

El enfriamiento nocturno busca enfriar así la estructura del edificio (en este caso la envolvente) a través de la ventilación cruzada al momento en que no se utilizan los recintos, haciendo uso de las bajas temperaturas presentes en el exterior al finalizar el día. Los espacios así deben ser pensados para que la distribución del aire sea la mejor posible, favoreciendo la transferencia de calor a este último por cantidad de superficie.

Determinar con certeza la efectividad de este depende de muchos factores, entre los más importantes el efecto que los objetos tienen en el flujo y dirección de aire tanto desde el exterior como al interior de los recintos y la energía aportada en forma de calor por parte del sol, superficies (efecto isla) y otras fuentes de calor como personas y equipos (Allard, 1998). Para ello se necesita un modelo complejo de fluidos que consideren tales variables, por lo que aquí solo se presentan recomendaciones respecto a las maneras más efectivas de ventilar respecto al diseño de espacios.

De acuerdo a León (2017), la mejor opción respecto a flujo de aire en relación a aberturas corresponde a aquellas similares de configuración

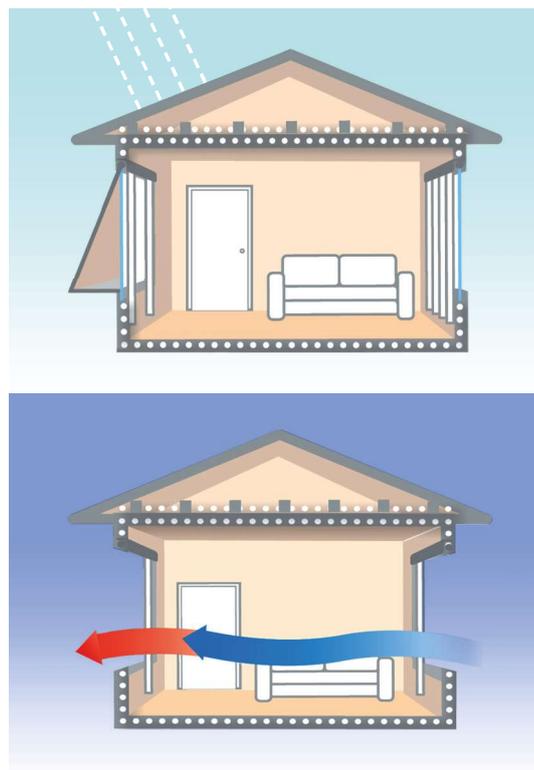


FIGURA 37
Esquema de ventilación nocturna (o *night cooling*)

Si la temperatura del aire exterior es mayor durante el día respecto a la de interior a causa del efecto de retraso (por inercia térmica de la noche anterior) se deben mantener las ventanas cerradas. Por la noche sin embargo, estas deben ser abiertas para enfriar la estructura en verano.

Fuente: Imagen obtenida del Gobierno del Sur de Australia, 2019.

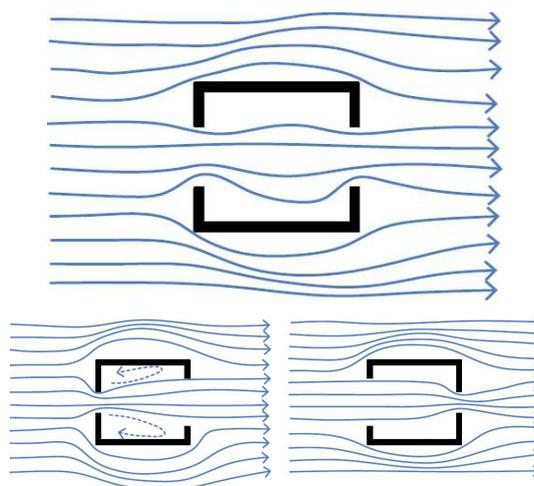
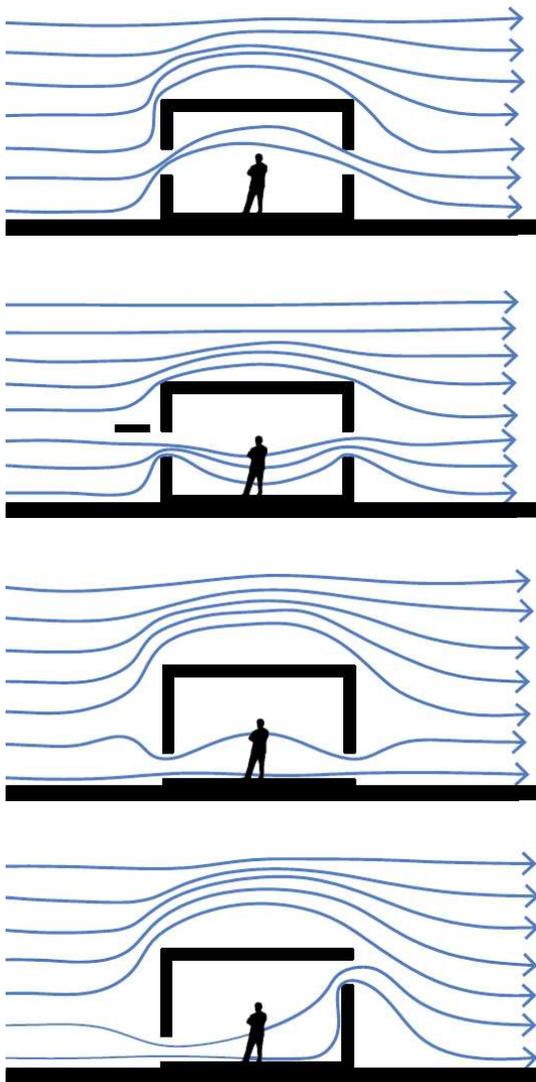


FIGURA 38
Recomendación sobre proporción de vanos en planta

La mejor opción es mantener una proporción equivalente de vanos opuestos en la dirección del viento

Fuente: Imagen obtenida de Escobar y Lama, 2018.



opuesta (figura 38), donde una sobrepresión en la superficie de entrada y una depresión en la de salida generan un flujo y circulación de aire mayores al interior de recintos. Aberturas contrapuestas en relación de tamaño 1:2 (siendo la de menor superficie la expuesta a la sobrepresión), generarán una fuerza de succión aumentando la velocidad del viento (más no su área de circulación), mientras que en relación 2:1 el flujo de viento interior tenderá a diluirse al existir una baja presión negativa de salida, siendo la configuración menos recomendable para efectos de ventilación natural.

Mientras se escoge la mejor configuración en planta para enfriar la estructura a través del viento y de manera homogénea, en sección existen otras capaces de brindar además confort al individuo modificando el flujo dependiendo del nivel de la actividad que se realiza sin modificar el principio anterior. Así, vanos ubicados a mitad de muro provocarán un flujo ascendente de salida (figura 39), lo cual puede arreglarse con elementos exteriores que modifiquen la dirección antes de ingresar al recinto. De otra manera, es usual colocar aberturas a nivel de suelo para generar un flujo a nivel de usuario.

De las configuraciones anteriores se asume un viento frontal dominante, de otra forma, se crearían turbulencias al interior del recinto. Cabe señalar además que este tipo de enfriamiento a nivel de usuario es más efectivo en la medida que el viento posea una menor temperatura exterior que interior, lo que para efectos de recintos con inercia térmica y en clima árido como el de Copiapó en verano, ocurre una vez llegado el atardecer.

En el caso exterior de la envolvente se pretende contar con gran parte del perímetro expuesto al flujo de viento en lo que se denomina menor compacidad, considerando el edificio como un volumen de múltiples aberturas (figura 40). El concepto de compacidad se define como el cociente entre la superficie de la envolvente exterior y el volumen que encierra (Wassouf, 2014). A través de esta operación se busca un intercambio de calor entre estructura y aire exterior de manera más rápida de acuerdo a la superficie expuesta y la generación de sombra, siendo una alternativa recomendada para climas cálidos de alta radiación solar.

FIGURA 39

Flujos de viento en sección a partir de altura de vanos

Aunque en ocasiones conviene mantener el vano en que ingresa el viento a nivel de suelo, en tierra apisonada es preferible contar con vanos de apertura que van desde la mitad hasta el cielo al contar con un muro de espesor y por ende carga considerable.

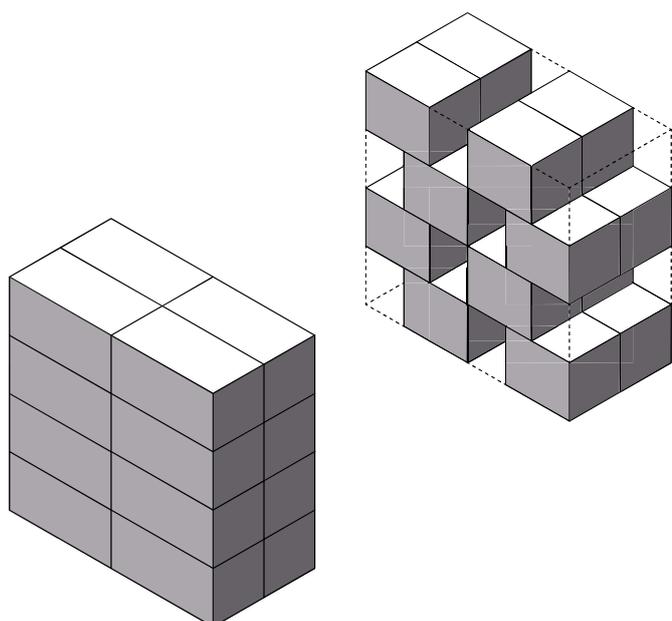
Fuente: Imagen obtenida de Escobar y Lama, 2018

FIGURA 40

Compacidad respecto a dos cuerpos de igual volumen

La superficie envolvente aumenta el contacto con el aire exterior a través de aberturas intercaladas

Fuente: Elaboración propia



2.2. Estado actual de viviendas en relación a su desempeño térmico de confort

Sondeo respecto a vivienda y percepción de confort interior estacional en Copiapó

Las características anteriormente descritas en relación al confort térmico interior en vivienda y las estrategias en base al recurso local-geográfico (viento y tierra), pueden verse reflejadas en el contexto urbano ya sea por su implementación o bien ausencia en distinta medida. Para conocer el estado en que la gente habita respecto a ello, se llevó a cabo una serie de encuestas descriptivas del tipo cerrado -donde el encuestado debe elegir entre un número acotado de alternativas- a 38 personas de distinta edad, género y condición social relativa al lugar en que residen, a fin de aportar una mirada aproximada sobre el tipo de vivienda presente en la ciudad y la percepción de clima que sus habitantes poseen en función de la materialidad y otras variables tales como la orientación y la configuración espacial de algunas unidades.

En ocasiones, se mantiene un diálogo posterior con los encuestados a modo de indagar sobre posibles motivos capaces de influir en la percepción de confort, lo cual es mencionado a continuación y en conjunto con los resultados graficados a partir de una síntesis tabulada presente en Anexos, al igual que el tipo de encuesta llevada cabo.

De esta se desprenden los siguientes puntos:

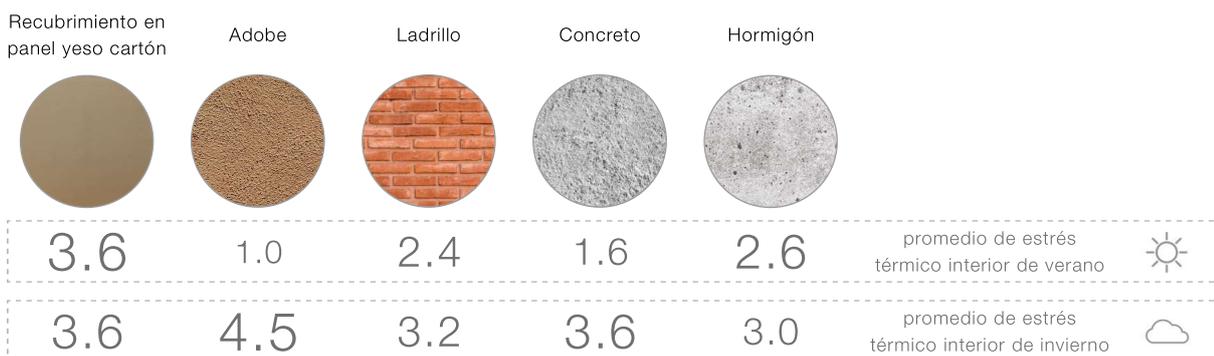
- Dependiendo de la materialidad de la unidad residencial es cómo resultará la percepción de los habitantes: Construcciones ligeras realizadas en madera con recubrimiento de panel en yeso-cartón -que pertenecen comúnmente a viviendas de menores ingresos o ampliaciones tanto en primer como segundo nivel- (figura 41), tenderán a percibirse tanto como muy calurosas o frías para todos los casos (figura 42).



FIGURA 41
Ampliación de vivienda en material ligero

Para los casos encuestados aquellos recintos elaborados de este material llegan a ser considerados tan calurosos como fríos

Fuente: Imagen obtenida de Google Street View, 2012



Construcciones antiguas en adobe con un espesor importante por otro lado resultan ser bastante efectivas para el caso de verano, sin embargo críticas en invierno. Lo mismo ocurre para otros materiales de 'masa' en mayor o menor medida dependiendo no solo del espesor, sino de la orientación -casos en sentido sur- la altura y su relación de lleno y vacío perimetral sobre vanos, infiltraciones de aire, y ampliaciones que pueden dificultar el ingreso de radiación solar para ganancias internas en periodos fríos.

FIGURA 42
Tipos de materialidad en vivienda y promedio de estrés térmico (o falta de confort) interior en verano e invierno
Valores en promedio donde 1 es agradable y 5 es gran falta de confort

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta realizada en terreno



FIGURA 43
Vivienda antigua en adobe y caña

Factores en conjunto como la materialidad (y su espesor), gran altura interior y grandes vanos generan un aporte positivo al confort en verano. Pese a ello, las mismas construcciones consideradas agradables para tal estación coinciden con una mala percepción en invierno.

Fuente: Fotografía de elaboración propia, Copiapó, 2019

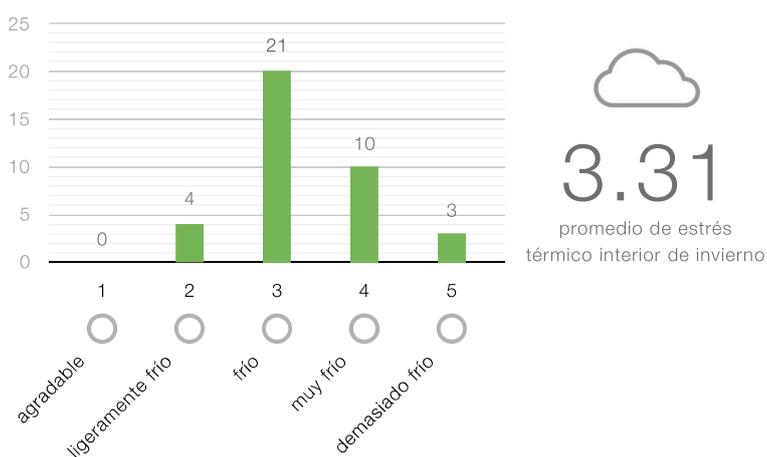
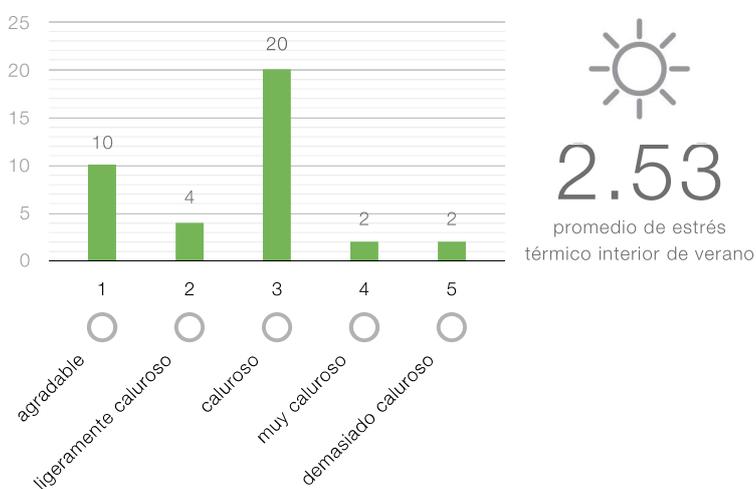
FIGURAS 44 y 45
Percepción general de verano e invierno para todos los casos

Se percibe una falta de confort más crítica en invierno, el cual presenta un valor promedio más cercano al valor 5 (en este caso catalogado como *demasiado frío*)

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta realizada en terreno

El caso 23 (de la tabla 1, ubicada en Anexos) por ejemplo, a pesar de contar con una buena percepción de confort interior en verano debido a muros elaborados en concreto con un espesor cercano a los 40cm y sobre una superficie elevada (ventilada) con orientación sur, encuentra necesario la presencia de un equipo de aire acondicionado en invierno para mantener una temperatura interior agradable de forma constante.

Ocurre algo similar para una construcción antigua en adobe (caso 27 en tabla y figura 43), cuya distribución espacial interior contribuye a hacerla un recinto más agradable en verano pero frío en invierno debido a la existencia de distintos patios interiores ajardinados que permiten una ventilación cruzada para recintos de más de 3 metros de altura.



- De la percepción general sobre confort interior para verano e invierno en la zona y para los distintos casos encuestados (figuras 44 y 45) se obtiene que el invierno presenta una situación tanto o más crítica por parte de los habitantes, por lo que un factor importante de diseño sobre estos espacios reside en la posibilidad de contar con una fuente de ganancias internas para tal periodo mientras se evita en verano.

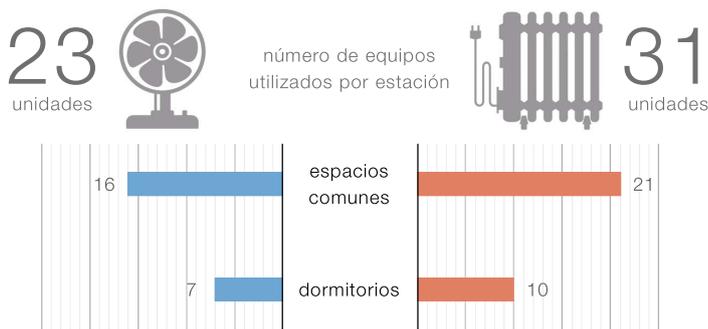


FIGURA 46

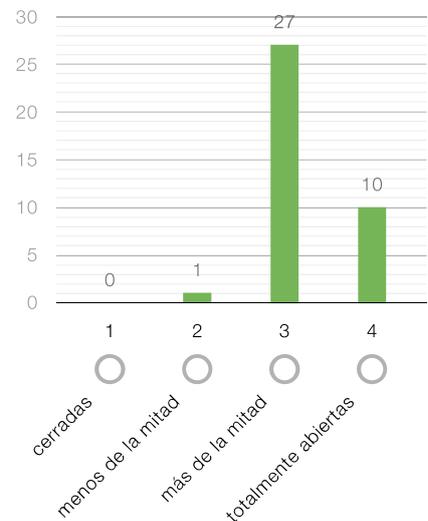
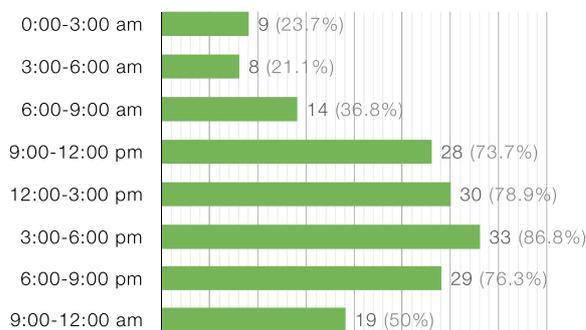
Presencia de equipos para enfriar y calefaccionar

Al igual que la encuesta de percepción según estación -verano e invierno respectivamente-, se observa una relación respecto a la cantidad de equipos.

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta realizada en terreno

La situación anterior puede verse reflejada en la cantidad de equipos presentes y destinados a aumentar el confort interior en vivienda para ambas estaciones (figura 46). De esta manera, existe un mayor número de equipos de distinta potencia empleados para calefaccionar -tales como estufas eléctricas, a gas, y leña entre las más usadas- en respuesta a la percepción anterior.

- Sobre las condiciones de ventilación natural a lo largo del día (ventilación cruzada) y durante verano, los habitantes acostumbran a realizar esta práctica durante la tarde (figura 47), lo que coincide con el periodo de mayor velocidad de viento para tal estación.



FIGURAS 47 y 48

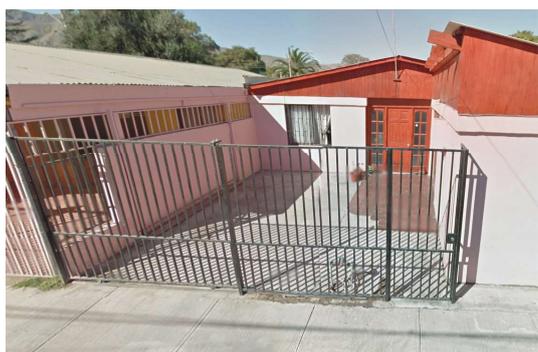
Horarios y magnitud de apertura de ventanas para ventilación

Conociendo los hábitos de ventilación en verano se advierte la posibilidad de contar con inercia térmica, la cual es efectiva si existe ventilación nocturna.

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta realizada en terreno

La importancia de tales datos radica también en la posibilidad de ventilar durante la noche para hacer uso efectivo de la inercia térmica. Pese a ser un número reducido, se advierte que las personas dispuestas a ventilar por la madrugada son aquellas que cuentan con la seguridad de poder hacerlo; así, unidades muy próximas a la acera o a cuerpos de agua preferirán mantener las ventanas cerradas a modo de impedir la entrada a desconocidos, insectos, y en menor medida del ruido exterior. El material particulado por otro lado, aunque existente en un medio donde pueden ocurrir tormentas de arena, no supone un mayor problema de acuerdo a los encuestados (figura 48).

- Existen por último ciertas prácticas frecuentes realizadas sobre las viviendas del sector con el potencial de mejorar o empeorar las condiciones de confort interior a lo largo del año junto con la cantidad de luz natural y viento que ingresa en las unidades.



FIGURAS 49 y 50
Cubierta y enlosado en casas unifamiliares

Múltiples viviendas prefieren la instalación de cubiertas tanto en patio como en antejardín junto con suelos pavimentados, lo que impide o refleja la radiación y luz incidente

Fuente: Imagen obtenida de Google Street View, 2012

Estas refieren principalmente a la instalación de cubiertas y la presencia de suelos exteriores pavimentados o enlosados en distinta medida (figuras 49, 50 y 51). En otros casos, la falta de luz o imposibilidad de poder ventilar correctamente se da por una suma de ampliaciones tanto en primer como segundo nivel. El efecto de tales intervenciones dependiendo de la estacionalidad queda sujeto a la orientación de la vivienda; así por ejemplo, un antejardín enlosado sin techar de orientación resulta menos crítico en comparación a uno norte, donde la radiación se ve reflejada gran parte del día.

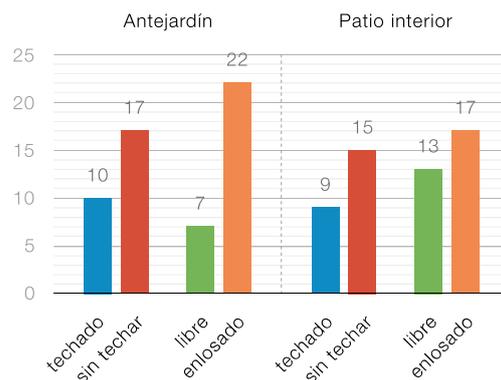


FIGURA 51
Intervenciones en espacios exteriores

Es común encontrarse con una mayor cantidad de suelos totalmente cubiertos debido a la presencia de polvo. La opción de contar con vegetación no es recurrente debido al tipo de suelo; si esta existe, se da en macetas.

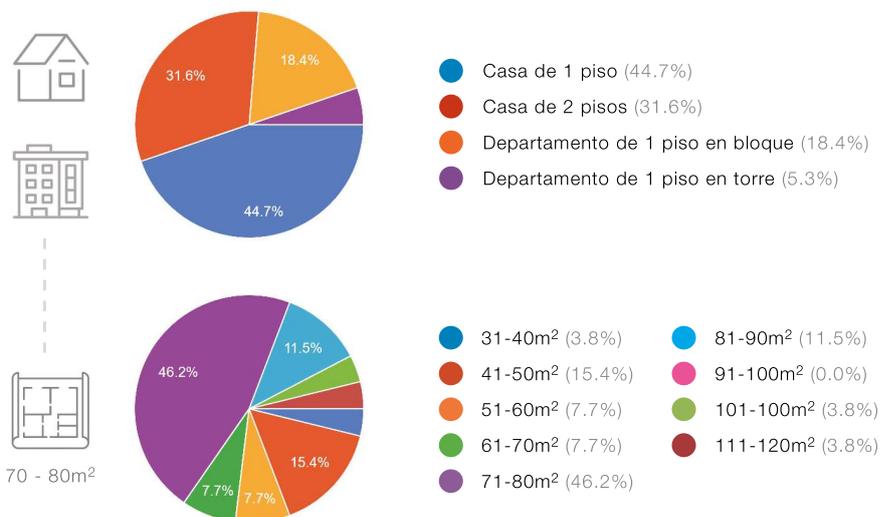
Elaboración propia en base a encuesta realizada en terreno

- Para el diseño de espacios y a modo de tener en consideración una dimensión sustentable económica -referido a lo que la gente es capaz de costear- se tiene que la vivienda recurrente de acuerdo al universo encuestado corresponde a la de un nivel con una superficie útil que va de los 70 a 80m² (figuras 52 y 53).

FIGURAS 52 y 53
Tipo de vivienda y superficie recurrente

La mayoría de encuestados reside en viviendas de un nivel con superficies menores a 80m²

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta realizada en terreno



Caracterización de la oferta inmobiliaria actual en Copiapó

La oferta inmobiliaria vigente en 2019 se caracteriza por presentar tres alternativas de vivienda que responden a lógicas de densificación, consolidación y expansión de acuerdo a distintas tipologías (torre, bloque, y casa respectivamente) ubicadas a lo largo de vías principales.

Destaca la manera en que la primera irrumpe en un contexto de baja altura (figura 54), donde conjuntos de mediana densidad surgen como una mejor alternativa para hacer frente a un proceso de continuo -y a veces lento o acelerado- crecimiento, el cual se encuentra íntimamente ligado al desarrollo minero, presentando a su vez la oportunidad de mantener un espacio comunitario familiar debido a una menor escala.

La superficie útil otorgada por todos los tipos en venta fluctúa entre los 30 a 80m² (figura 55 y 56) de manera similar a la superficie percibida por la mayoría de encuestados en el punto anterior, aunque siendo la más frecuente en este caso la que se encuentra entre los 50 y 60m² de hasta 3 dormitorios. Los precios por otro lado promedian las 2200 UF (unidades de fomento) donde en algunos casos existe el subsidio de integración social (DS19) para familias que buscan adquirir su primera vivienda con apoyo del Estado.

Sobre las características físicas de muchos proyectos y a diferencia de estudios previos los cuales sostienen que las áreas comunes verdes son un atributo de valor (Durán, 2018), se puede observar que aunque el espacio común si responde a tal visión en cuanto a posibilidad de esparci-



FIGURA 54
Edificio Parque Alameda

Fuente: Fotografía de elaboración propia, 2019

FIGURA 55
Proyectos inmobiliarios en venta

Gran parte de ellos se encuentran construidos en la actualidad.

Fuente: Respectivas páginas inmobiliarias en Copiapó

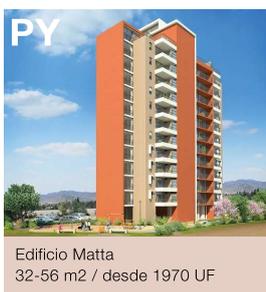
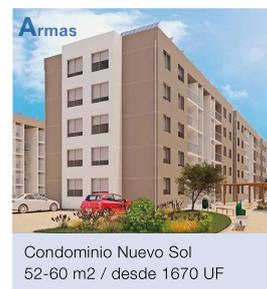


FIGURA 56
Emplazamiento de los proyectos actuales

Fuente: Elaboración propia en base a Plano Regulator



miento, estas no cuentan con un mayor número de áreas verdes respecto a cualquier superficie de una vivienda habitual (figuras 57 y 58), lo cual demuestra una cierta comprensión sobre la dificultad de contar con una mantención constante para ciertas especies en contexto árido, ya que muchas de las utilizadas suelen ser introducidas.



FIGURAS 57 y 58

Condominio Nuevo Sol y departamentos Altos de Copiapó

Espacios comunes entre unidades de vivienda se componen mayormente de piedrecilla o pavimento para estacionamientos

Fuente: Fotografías de elaboración propia, 2019

La condición interior de los departamentos en oferta por otro lado se encontrará mayormente determinada por la orientación y posición de la unidad en el edificio (si permite ventilación cruzada), ya que el hormigón otorga una cierta inercia respecto a los grandes cambios de temperatura a lo largo del día. Se puede establecer sin embargo que algunos departamento obtendrán mayores ganancias solares que otros, provocando situaciones poco agradables tanto en verano como en invierno, como suele suceder para el mismo tipo de vivienda en serie establecido en el resto del país.

Se observa finalmente que para proyectos inmobiliarios referidos a casas y al igual que para departamentos en venta, resultan ser un modelo frecuente de albañilería y ladrillo establecido bajo una lógica de loteo. La diferencia entre ellos radica en las transformaciones que los mismos propietarios llevan a cabo de manera posterior (figura 59), ampliando la superficie interior o bien adaptando tanto el antejardín como el patio a lugares sombreados en busca de un recinto en el cual permanecer con cierta permeabilidad, lo cual, al igual que lo mencionado con anterioridad tiende a comprometer las cualidades de ventilación e ingreso de luz natural.



FIGURA 59

Casas Altos de Copiapó

Las intervenciones varían tanto en forma como en materialidad

Fuente: Fotografía de elaboración propia, 2019

3. Confort térmico y eficiencia energética ligado a estrategias de diseño pasivo en zona árida

3.1. NZEB/ZEB: concepto y posibilidad de implementación a través de estrategias pasivas de diseño

Dependiendo de las decisiones que se toman al construir la vivienda y que pueden afectar al consumo de energía desde la falta de confort y la utilización de equipos eléctricos en respuesta a ello, es que el edificio se encontrará próximo a ser eficiente o no. Aquello, posee un gran impacto ambiental y económico si se considera que las edificaciones significan casi el tercio de la energía consumida hoy en día a nivel global, situación que se agrava a medida que la población y los índices de prosperidad aumentan en un impacto ambiental cada vez más notorio. En Estados Unidos y hacia 2005, solo el sector comercial y residencial en conjunto utilizaban hasta un 70% de la energía eléctrica, esperando un incremento de un 50% respecto a esta cifra hacia 2025 (U.S. Department of Energy).

En múltiples países —tales como Australia, Canadá, o Brasil, además de Estados Unidos— se ha adoptado el concepto de Edificios de Energía Neta Cero (*Net Zero Energy Building*, figura 60) o simplemente Edificios de Energía Cero en un compromiso que plantea hacer frente a tales demandas tanto energéticas como ambientales a través de un diseño integrado en el ámbito de la construcción, siendo una práctica

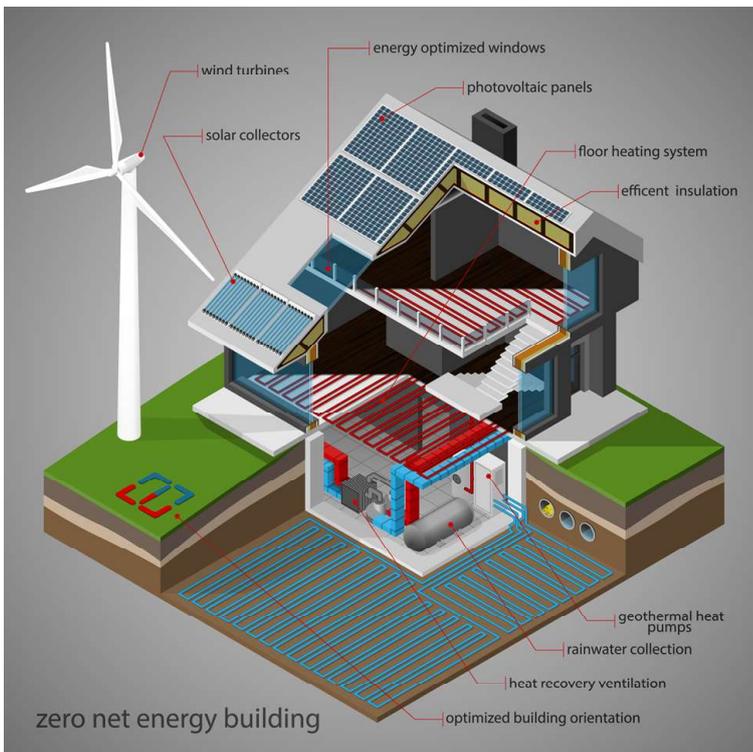


FIGURA 60
Sistema Net Zero convencional

Es común observar el uso de equipos y sistemas eficientes en relación a generadores de energía renovable; esto no siempre es la mejor alternativa para el primer elemento debido a su elevado costo, por lo que conviene optar por alternativas de diseño pasivo como la principal estrategia de confort térmico a utilizar.

Fuente: Imagen obtenida del sitio Energy in Time, 2017

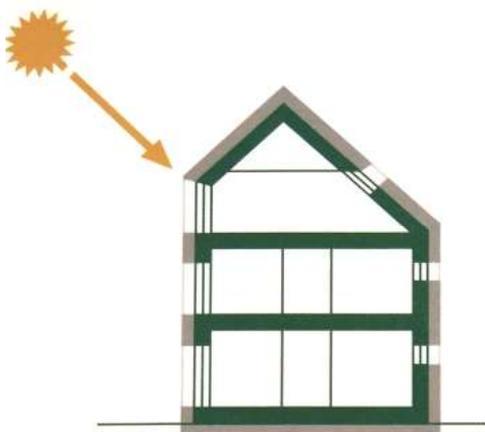
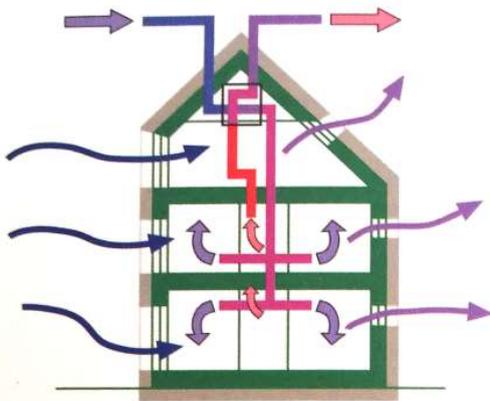
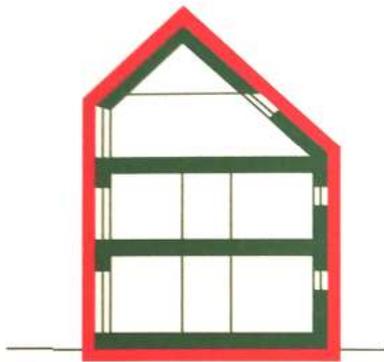


FIGURA 61

Estrategias pasivas a utilizar a favor de la eficiencia energética

Al igual se trata en la investigación se presentan las estrategias tales como orientación, envolvente, y ventilación como las más relevantes a la hora de producir un efecto positivo en cuanto al consumo de energía ligado al confort térmico.

Fuente: Imagen obtenida de Wassouf, 2014

relativamente nueva para algunos mientras que otra ya establecida hace años en países desarrollados como ocurre en el continente europeo. Es en aquellos lugares donde la práctica ya se ha establecido, que existen metas hacia 2050 de contar con una mayoría respecto a este tipo de edificios en torno al acuerdo de París llevado a cabo en 2012 para combatir el cambio climático.

Para que un edificio sea considerado de energía cero, y para efectos de esta investigación ligado a la fuente de energía (Net Zero Source Energy Building) y al edificio en sí mismo a diferencia de otros que toman en cuenta el sitio (Net Zero Energy Site, lo que comprende consumos de iluminación exterior y otras operaciones), debe producir la energía renovable anual suficiente para satisfacer sus demandas, pudiendo llegar a un excedente que es devuelto a la red y reduciendo así el consumo por parte de fuentes que generan energía en base a elementos contaminantes.

Además de tal ventaja, un edificio de energía cero pretende disminuir los costos de mantenimiento y contar con un sistema independiente en caso de apagones o desastres naturales.

Para efectos de cálculo, la energía utilizada por el edificio considera medios de calefacción, enfriamiento, ventilación, y servicios de agua caliente, además de suplir la necesidad de otros aparatos conectados y de iluminación. Parte importante del consumo se encuentra ligado a los primeros tres, en donde estrategias de diseño pasivo (figura 61) cobran vital relevancia para reducir las demandas generadas por el uso de sistemas mecánicos que intervienen en el confort interior, en ocasiones hasta en su totalidad, a través renovaciones naturales de aire, materiales constructivos con propiedades aislantes o de inercia y capaces de tolerar la humedad ambiente (National Institute of Standards and Technology, 2010). No sacrificar aspectos de confort para alcanzar una demanda equivalente a la energía generada de manera local resulta esencial para cumplir con el concepto de energía cero.

Es de esta manera que se cuenta con un potencial de transformar la forma en que los edificios residenciales utilizan la energía, convirtiéndose en el principal atractivo para usuarios que comparten aquellas inquietudes tanto económicas como medioambientales. Cabe señalar sin embargo que existe confusión o desconocimiento respecto al término, sobre todo en regiones donde su implementación es más bien reducida o reciente como ocurre en Chile, resultando el apoyo económico por parte del gobierno y una transformación en las políticas de venta desde el sector inmobiliario como medidas efectivas para el desarrollo y establecimiento de este estándar, al que suele acompañarle el Certificado de Energía Renovable (*REC* por sus siglas en inglés, U.S. Department of Energy, 2015).

La región de Atacama posee un importante potencial de implementación no solo por los recursos naturales que aquí se tratan (en términos de inercia térmica y ventilación), sino al poseer uno de los ambientes más favorables para la generación de energía renovable a través del sol, al contar con una notable cantidad de días despejados y uno de los valores más altos en cuanto a radiación global anual a nivel nacional (Durán, 2018).

Así, se cuenta con una importante fuente de energía alternativa en una región cuya electricidad es generada en un 67.1% en base a carbón, donde el sector residencial y comercial adquieren un mayor peso frente a la industria (sin considerar el sector minero; Energía Región, 2017).

La calidad pasiva del edificio —y por ende su efectividad— finalmente se caracterizará entonces por el consumo de esta energía por parte del

mismo en cuanto a calefacción y refrigeración, considerando:

1. pérdidas a través de la envolvente térmica, 2. pérdidas por ventilación, y 3. ganancias a través de la radiación solar y personas o equipos al interior (Wassouf, 2014; figura 61), lo que puede ser resuelto a través del diseño considerando la orientación, la compacidad, calidad de la envolvente, y aspectos relacionados a la ventilación entre los más importantes.

3.2. Estudio de referentes contemporáneos en zona árida

La arquitectura contemporánea en zona árida usualmente reconoce estas necesidades en un clima considerado extremo debido a las grandes fluctuaciones de temperatura y la falta de precipitaciones a lo largo del año, situaciones capaces de condiciones la materialidad y el diseño de espacios a fin de mantener un confort térmico interior sin el apoyo de sistemas mecánicos. Distintas culturas y arquitectos alrededor del mundo han sabido adaptarse a este clima (figura 62) haciendo uso de las ventajas que aquel ofrece sobre tal confort a la intemperie y mayormente en verano, proyectando lugares que forman un diálogo con el exterior o lo habitan de forma directa bajo la sombra.

Junto a ello, es posible observar una arquitectura de muros gruesos y materialidad de inercia térmica en configuraciones compactas acompañadas de pequeños vanos y estructuras ligeras que aminoran la incidencia de radiación hacia el interior permitiendo a su vez una ventilación constante. Lo que parece ser una preocupación mayor por el periodo de mayores ganancias solares, en el caso de Copiapó debe compensarse con otra respecto a las bajas temperaturas existentes en el periodo de invierno, a modo de permitir aquellas ganancias que se intentan evitar en verano.

Respecto a las estrategias de diseño arquitectónico pasivo conocidas tanto como para disminuir o aumentar la temperatura y referidas a: orientación y protecciones solares, factor de forma, masa o inercia térmica, tipos de ventilación (cruzada, convectiva, y nocturna), se hace énfasis en aquellos referentes que emplean o consideran la ventilación e inercia térmica al tratarse de elementos presentes y variables de acuerdo al lugar. Se considera en parte el enfriamiento evaporativo en la medida de utilizar plantas en un contexto de futura sequía en Copiapó, donde la reutilización de agua puede ser aprovechada con tales fines.

Orientación y forma en base a ganancias solares y ventilación

Es común observar que en gran parte de los casos actuales construidos en zona árida o desértica se opta por una orientación en que gran parte de los vanos se encuentran opuestos al de incidencia solar. Obras ubicadas en el hemisferio norte como Nevada, Estados Unidos por ejemplo (figura 63), donde la principal incidencia solar se da desde el sur, optarán por espacios con múltiples vanos hacia el norte para evitar las ganancias solares directas en verano.

Por otro lado, la manera de construir en variados casos es disponer de volúmenes largos de este a oeste, capaces de permitir ventilación cruzada durante el día como bien menciona José Tomás aludiendo a la Casa Rondolino: "La casa está orientada de tal manera que puede aprovecharse de los vientos predominantes que, a través de ventilación cruzada,

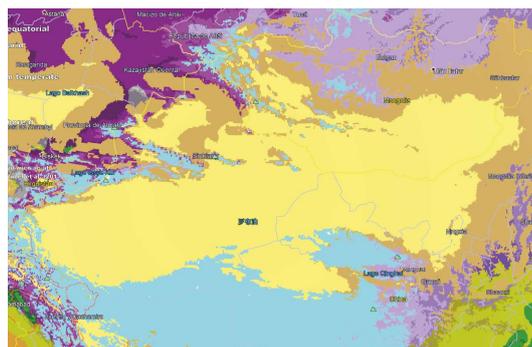
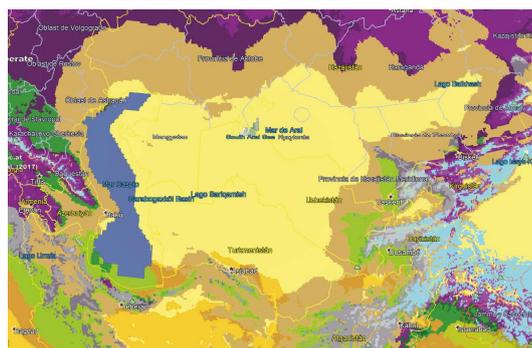
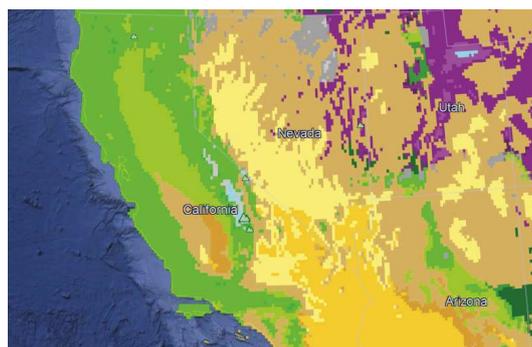


FIGURA 62
Lugares que comparten el clima de Copiapó (Bwk o desértico frío a grandes rangos según la clasificación de Köppen, representado en amarillo pálido)

El clima presente en el norte de Chile hasta la tercera región (1) se encuentra también en mayor proporción en lugares tales como Nevada, Estados Unidos (2), Kazajistán (3), Mongolia y China (4).

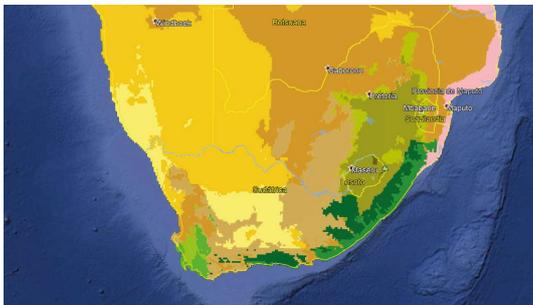
Fuente: Imágenes obtenidas de Google Earth en conjunto con World Maps of Köppen - Geiger Climate Classification (2017).

mantienen una temperatura agradable en la casa, evitando la necesidad excesiva de energía y sistemas de aire acondicionado” (2011).

La misma casa posee una cubierta sobre el deck sur para evitar la incidencia solar directa como ocurre en otros casos de desierto.

Utilización de aleros como captador de vientos

En el caso de otras obras es posible encontrar estructuras en voladizo o cubiertas que poseen la capacidad de conducir el viento hacia determinados espacios como ocurre en la obra llevada a cabo por DUST (figura 64). La misma se construye en tierra apisonada lo que permite un ambiente agradable al interior debido a la inercia térmica. Al igual que el caso anterior, el volumen total se distribuye en sentido este-oeste a modo de contar con una orientación solar de fácil control, en donde los espacios que se encuentran con vistas hacia el sur —gracias a la cubierta extendida— además de captar el viento permiten grandes vanos traslúcidos hacia el exterior, haciendo uso de las ganancias solares en invierno debido al ángulo de inclinación que el sol posee en tal periodo.



FIGURAS 65 y 66
Clima de Sudáfrica (Bwk en amarillo pálido)
y Casa Swartberg en el desierto de Karoo

Openstudio Architects, 2015

Fuente: Imágenes obtenidas de Google Earth en conjunto con World Maps of Köppen - Geiger Climate Classification, 2017, y Plataforma Arquitectura, 2016

Construcción de masa y vanos reducidos

La obra llevada a cabo en Sudáfrica con un clima similar al de Copiapó (figura 65) llamada Casa Swartberg (figura 66), se construye en materiales masivos (muros de yeso tosco, cal, y ladrillo) bajo un diseño de aproximación pasiva con estrategias tanto para verano como para invierno. Esto se logra a través de grandes aperturas protegidas por celosías verticales correderas (figura 67) que impiden el exceso de radiación en verano, permitiéndolo en invierno, almacenando calor en el oscuro piso de ladrillo. Por otro lado, sumado a estos criterios para el verano, la obra se proyectó



FIGURAS 67 y 68
Protecciones solares y aberturas al interior de la vivienda

Fuente: Imágenes obtenidas de Plataforma Arquitectura, 2011.



FIGURA 63

Casa Rondolino en el desierto de Nevada, Estados Unidos
Estudio nottoscale, 2010

El único sistema utilizado aparte del aire acondicionado es losa radiante para invierno, denotando una menor consideración para periodos fríos.

Fuente: Imágenes obtenidas de Plataforma Arquitectura, 2011



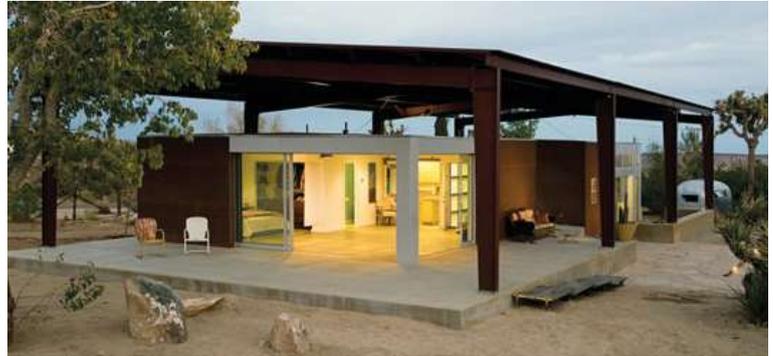
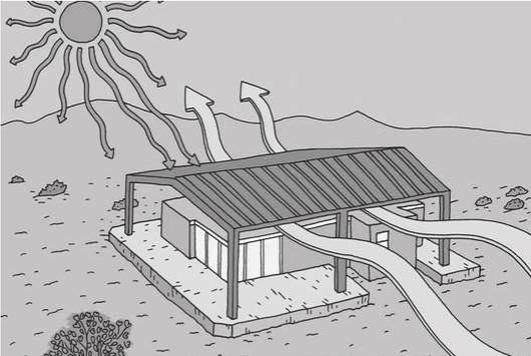
FIGURA 64

Refugio en la Montaña Tucson, Arizona, Estados Unidos
Estudio DUST, 2012

Fuente: Imágenes obtenidas de Plataforma Arquitectura, 2013



con múltiples aperturas menores en las zonas de estancia con el fin de permitir una ventilación constante en múltiples direcciones (figura 68). La misma estrategia permite una adecuada iluminación cuando se intenta proteger el interior de ganancias solares excesivas.



FIGURAS 69 y 70

Esquema de ventilación en cubierta extendida y vivienda

Diseñada por Lloyd Russell se encuentra emplazada en zona de clima árido correspondiente a California

Fuente: Imágenes obtenidas del sitio web Fast Company, 2009

Cubierta de efecto convectivo o disipador

En ocasiones se recurre a cubiertas de material reflectivo capaces tanto de producir sombra como de acumular calor para actuar de manera convectiva respecto al viento incidente, aumentando su velocidad (figura 69). Tal es el caso de una vivienda desértica ubicada en Pioneertown, California (figura 54). El sistema asemeja la condición de una fachada ventilada con una capa de aire intermedio que actúa como amortiguador respecto al calor acumulado por la cubierta. De manera similar aunque relacionada al interior existen otras como la que presenta el Hospital Sarah Kubitschek en Brasil (figura 55) en clima cálido. Esta no solo permite un mejor flujo de aire hacia el exterior mediante el efecto convectivo, sino un mayor ingreso de luz de forma controlada, similar al de una chimenea solar incorporada a espacios comunes.

Por otro parte, se puede optar por privilegiar la inercia en lugar de la ventilación desde una cubierta con vegetación acorde al clima (figura 56) evitando las ganancias solares directas sobre la superficie y actuando a su vez como un elemento aislante durante invierno.



FIGURAS 55 y 56

Cobertizo metálico curvado y cubierta vegetal en clima cálido

En el primer caso el aire circula desde entradas que existen a nivel de suelo para elevarse hasta la cubierta y ser renovado.

Fuente: Imágenes obtenidas del sitio web ArchDaily, 2012 y 2010.

Espacios ajardinados intermedios

Para potenciar el efecto de ventilación en zona árida se utilizan patios interiores ajardinados a la sombra, capaces de aportar humedad al ambiente. Muchas veces ubicados al centro de la edificación, como es el caso de diversas construcciones de carácter mediterráneo. En sectores áridos cálidos (o BWh de acuerdo a la clasificación de Köppen) como ocurre en la obra de AGi Architects (2016, figura 57) localizada en Kuwait, estos espacios en vivienda suelen ir acompañados de cuerpos de agua que contribuyen a la humedad ofrecida por el material vegetal; en Copiapó sin embargo, se apunta a utilizar únicamente vegetación capaz de humedecer el ambiente en cierta medida. Aquí, el efecto se ve potenciado al conectar tres espacios ajardinados en distintos niveles donde el más alto se encuentra abierto al exterior a modo de permitir ganancias solares en invierno.

Porosidad y rugosidad en superficies divisorias

Para garantizar la ventilación interior con ayuda de estos espacios, es necesario disponer de la menor cantidad de obstáculos que puedan generar un cambio en la dirección del flujo de aire. Para ello, y si se dispone de protecciones solares al exterior (figura 58) o divisiones interiores, es clave pensar en la necesidad de contar con barreras que presenten aberturas en cierta proporción como ocurre en el caso de la Casa PH en Vietnam (clima cálido, figura 59). La misma altura o posición interior en que estas divisiones son colocadas respecto a la entrada y salida de aire afectará la velocidad en que el mismo se encuentre (Pereira, 2018).

Por último, en climas áridos, con el objetivo de minimizar ganancias solares directas sobre la superficie exterior, se recomienda contar con un acabado rugoso (Mofidi, 2007) con la finalidad de evitar reflexiones directas tanto de luz como de radiación provenientes del sol hacia otros lugares de permanencia. Ejemplo de ello se puede encontrar en la fachada del Museo de Yves Saint Laurent en Marrakech, Marruecos (clima semiárido-cálido al norte de África, figura 60) donde el muro posee elementos sobresalientes capaces de generar sombra en el mismo.

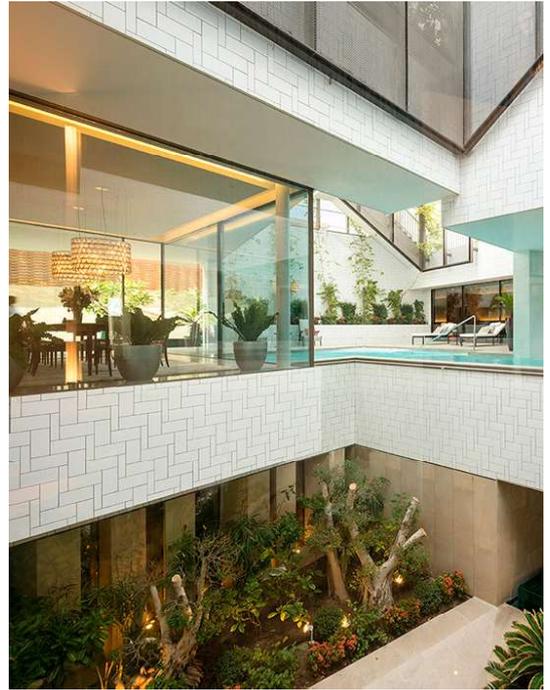


FIGURA 57
Patios interiores conexos

Tres patios actúan en conjunto frente al programa residencial a su alrededor como amortiguador climático

Fuente: Imagen obtenida de AGi Architects, 2017

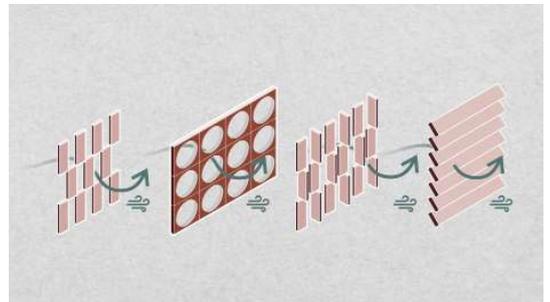
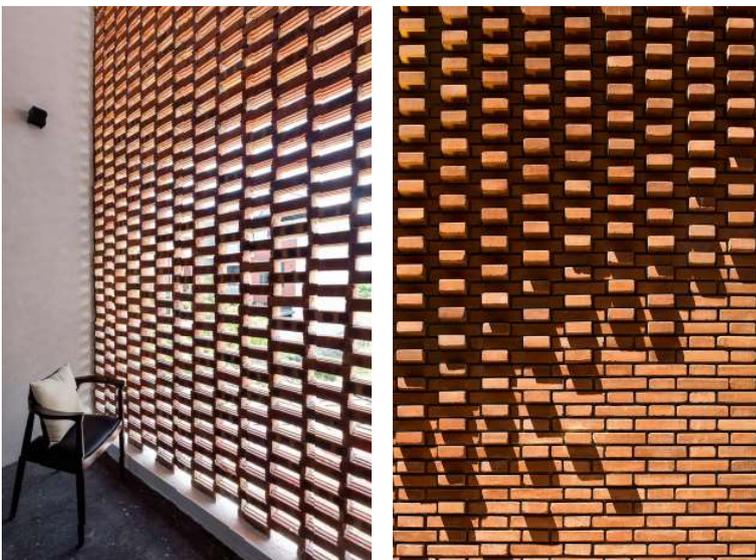


FIGURA 58
Parasoles permeables

La manera en que permiten el flujo de aire dependerá tanto de la proporción de aberturas como de la materialidad

Fuente: Imagen obtenida de Plataforma Arquitectura, 2018



FIGURAS 59 y 60
Muro exterior permeable y superficie exterior rugosa

Su utilización suele darse en climas cálidos, tropicales, y áridos, donde la ventilación y el uso de sombra en superficie es clave

Fuente: Imágenes obtenidas de Plataforma Arquitectura, 2018, y Revista AD, 2017

Síntesis de estrategias utilizadas en referentes contemporáneos

De los casos anteriores se desprenden ciertos partidos generales referidos a ventilación e inercia térmica que harán de tales elementos, presentes en el contexto árido, una alternativa efectiva para el enfriamiento pasivo:

Orientación	Dispuesto hacia el norte con un volumen alargado en sentido oriente-poniente y aberturas que permiten ventilación cruzada
Forma	Capaz de conducir el viento hacia el interior de la unidad con anterioridad
Distribución espacial	En torno a patios de enfriamiento evaporativo para potenciar el efecto de ventilación
Cubierta	Del tipo convectivo o bien pensada para continuar la envolvente de inercia térmica a través de material vegetal
Estructura	De masa acompañada por aberturas reducidas y distribuidas a modo de permitir una entrada continua de aire
Superficie exterior	Rugosa a modo de evitar reflexiones directas sobre otras superficies
Protecciones	Solares exteriores capaces de permitir ventilación por medio aberturas como ganancias solares directas en invierno

3.3. Alternativa proyectual bajo el concepto de ventilación e inercia térmica

Estudio iterativo de ventilación a través de simulación digital

Teniendo en cuenta las recomendaciones presentadas a través de referentes y la caracterización de vivienda en Copiapó, se ponen a prueba distintas alternativas de ventilación a nivel de conjunto y unidad de vivienda, con volúmenes hipotéticos de departamento cercanos a los 70m² y dispuestos en hilera a modo de adaptar un espacio semipúblico sombreado interior.

Tales hileras contarán con 4 niveles de altura en respuesta a la necesidad de densidad media que presenta el sector, y núcleos de escalera entre unidades, a modo de no perjudicar la ventilación cruzada de las mismas dispuestas a lo largo en sentido suroeste-noreste. La orientación responde a su vez de manera frontal al viento incidente predominante en el periodo cálido (primavera-verano) que proviene del noroeste con una velocidad promedio de 5m/s desde el mediodía hasta las 6 de la tarde y entre 5 a 16 metros de altura.

Mediante simulaciones llevadas a cabo en un túnel de viento digital utilizando el programa Flow Design de Autodesk, se busca analizar la distribución de vientos y su velocidad tanto en sección como en planta al atravesar el conjunto bajo distintas configuraciones. Así, se busca obtener noción de las características espaciales de diseño que contribuyen a una distribución más homogénea del recurso para enfriamiento pasivo en las distintas unidades residenciales del caso planteado, mientras se observa el efecto que tales distribuciones producen en la velocidad del viento, permitiendo un uso más eficiente del mismo.

Iteraciones de conjunto

En una primera aproximación, se realizan iteraciones a partir de la configuración de unidades junto a los núcleos de escalera, los que, en esta primera etapa se consideran vacíos y son tratados como espacios que posibilitan el paso de viento. Previo a ello, se cuenta con el caso hipotético base en que todos los volúmenes constituyen un lleno para comparaciones posteriores. Cada nivel posee una altura inicial de 2.5m, llevando la altura del conjunto a un total de 10m para efectos de simulación.

A través de este caso base se pueden observar algunos problemas frecuentes que poseen los conjuntos residenciales construidos en la actualidad y presentes en el contexto urbano de Copiapó (con énfasis en el periodo de primavera-verano de acuerdo a la velocidad de viento utilizada, figura 61). Estos problemas corresponden a una ventilación deficiente (o sombra de viento, referido a espacios carentes de flujo) tanto para las unidades residenciales ubicadas al sureste de la segunda hilera (que no recibe viento directo) como para el espacio común interior (con un ancho de 12m que se mantiene a lo largo). Contar con volúmenes llenos también afecta a las residencias cercanas al conjunto al impedir un adecuado flujo de viento. A tales problemas se suma la presencia de una fuerte presión y velocidad de viento en los pisos superiores del primer volumen.

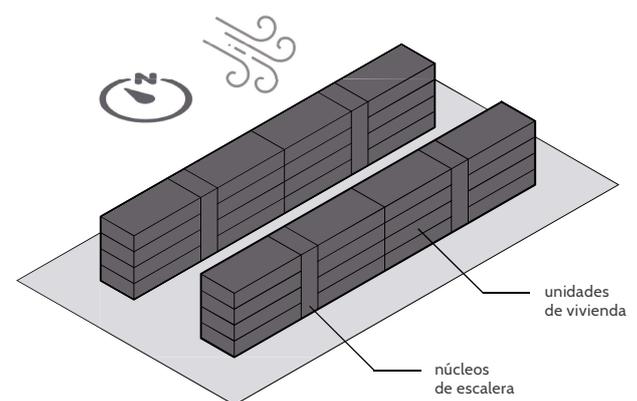
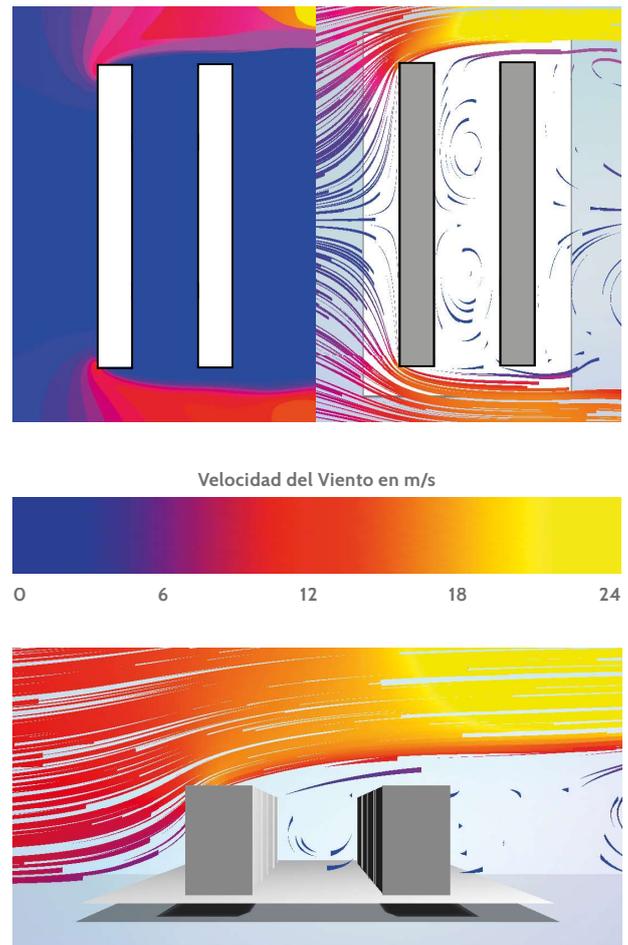
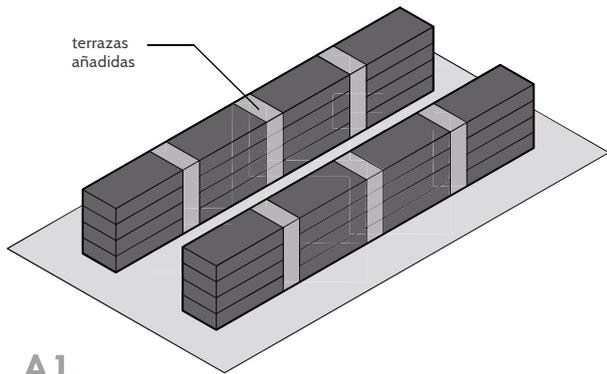


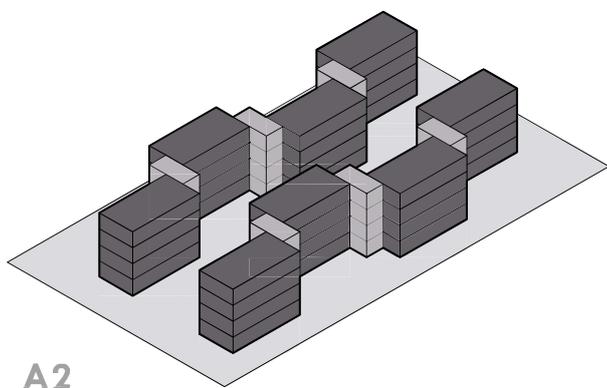
FIGURA 61
Caso de iteración base

Se cuenta con un volumen que considera tanto unidades residenciales como núcleo de escalera cerrados, como suele suceder en un conjunto residencial de densidad media habitual. De esta manera se observa que la primera hilera de viviendas conforma una barrera para la adecuada ventilación de la adyacente y otras residencias ubicadas fuera del conjunto en la dirección del viento.

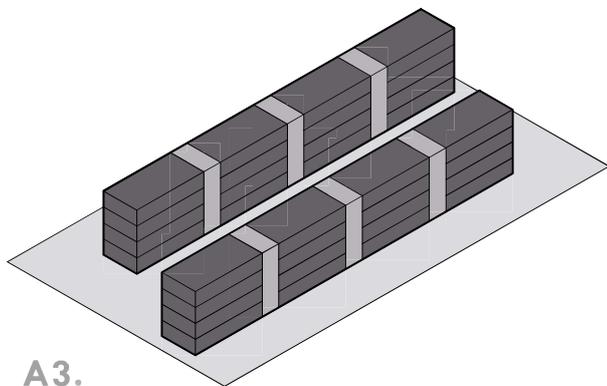
Fuente: Imágenes de elaboración propia a través de Flow Desing



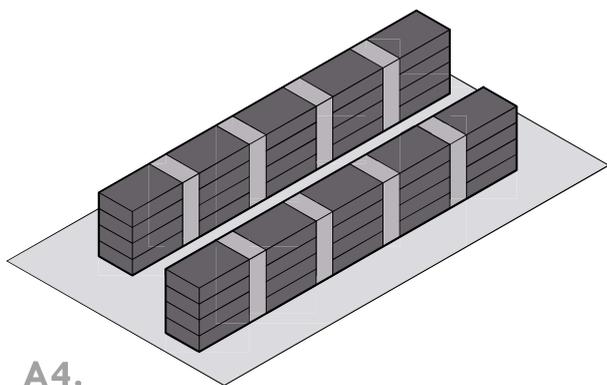
A1.



A2



A3.



A4.

Para los casos iterados a continuación, se consideró la variable de posición respecto a volúmenes llenos (gris oscuro, referente a departamentos) de vacíos (gris claro, considerado como núcleos de escalera) a nivel de conjunto y en planta. Más adelante, se analiza la configuración en la componente vertical (o de sección) para acabar con la forma de la unidad residencial en cuanto al ángulo en relación con el viento incidente.

El primer caso iterado (A1, figuras 62 y 63) corresponde a un volumen similar al base considerando los núcleos de escalera como abiertos. A ello, se le suma un volumen de terrazas en el centro a modo de equiparar los espacios abiertos entre unidades. En tal caso se observan flujos en donde la velocidad aumenta considerablemente para los corredores abiertos, mientras se genera cierta turbulencia de baja velocidad hacia el interior del conjunto. A diferencia de los otros casos, el flujo de salida se comporta de manera más homogénea, asegurando una mejor ventilación para conjuntos adyacentes.

Para el caso A2 en que las unidades de vivienda son desplazadas, la velocidad entre aberturas aumenta aún más restando la misma a espacios comunes interiores de conjunto.

En la iteración A3 se decide mover la hilera a media unidad, llevando el flujo de viento directamente a las unidades posteriores, aquí se observa en planta, que en ambos extremos, este se desvía hacia zonas de mayor presión en donde la velocidad aumenta. El resultado, sin embargo, es favorable en relación a los casos anteriores en términos de viento incidente para las unidades como es de esperar, pero no así para la sombra de viento que acaba por generar, lo que ocasiona problemas para unidades vecinas fuera del conjunto.

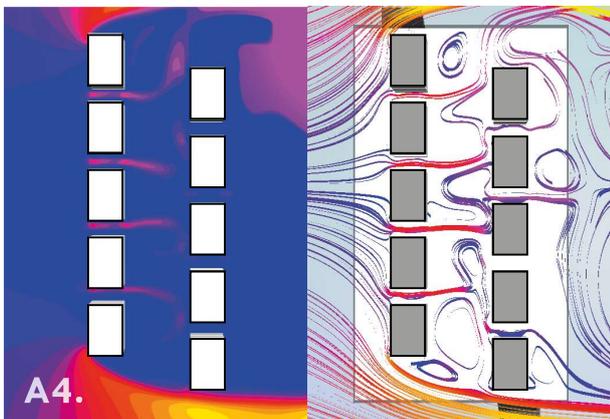
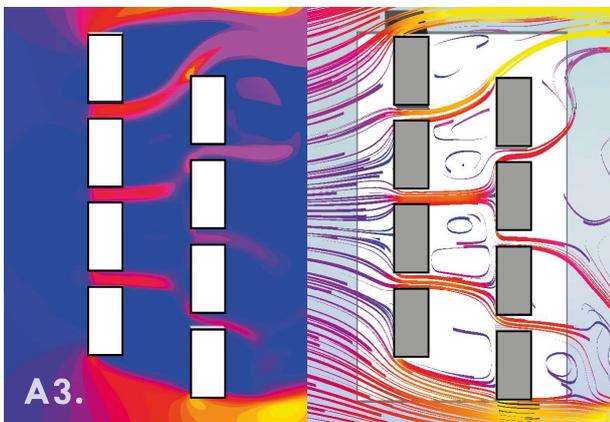
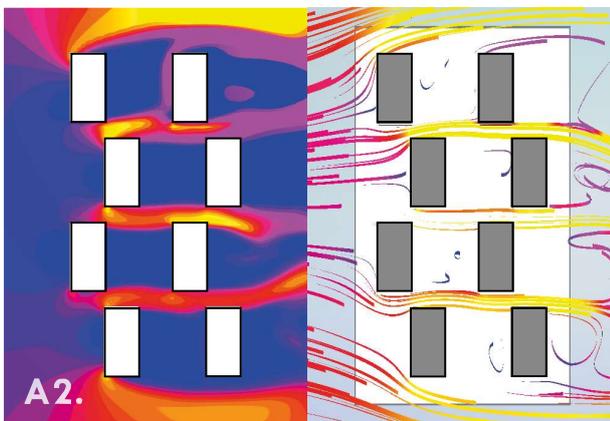
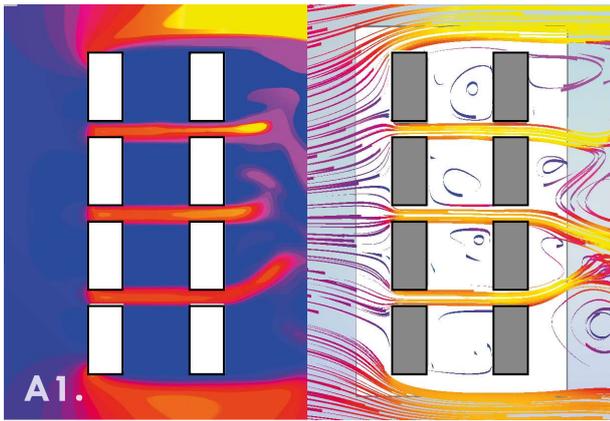
Finalmente en A4 se reduce el tamaño de las unidades residenciales y aumenta el número de núcleos y terrazas, en los que se observa una mejor distribución de la ventilación para todas las unidades enfrentadas y de menores velocidades para su adecuado empleo tanto para las mismas como para el espacio común interior resguardado del sol pensado para el conjunto. De manera similar y debido a la cantidad de aberturas se puede esperar un tamaño de sombra de viento menor capaz de permitir el recurso a otras unidades fuera del conjunto.

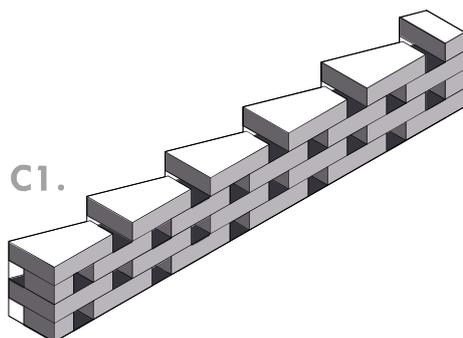
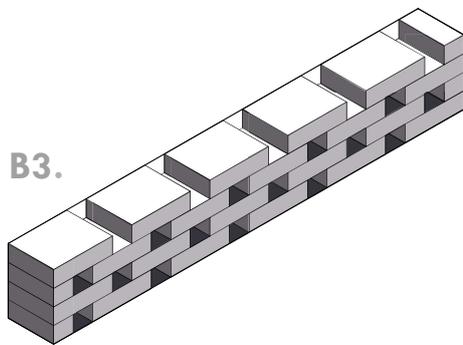
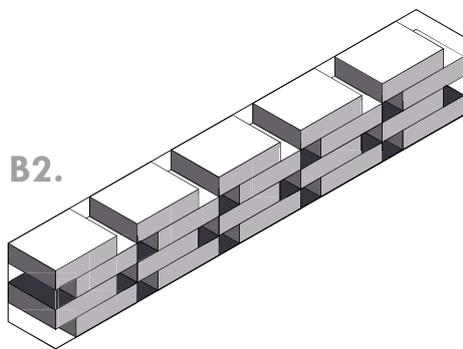
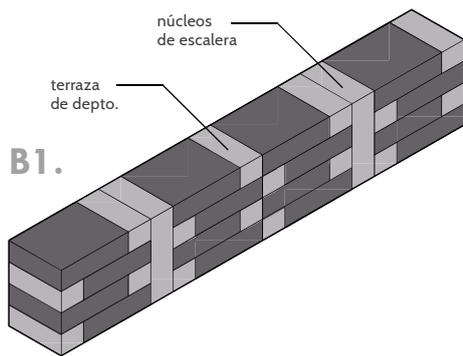
De esto se obtiene que en planta, alternar las unidades y aumentar el número de aberturas corresponde a una medida inicial favorable al momento de contar con un viento de mayor homogeneidad tanto para unidades residenciales como para espacios comunes exteriores e interiores de conjunto, así como de flujo constante en términos de velocidad tanto para los departamentos como para otras unidades vecinas. Es necesario sin embargo resolver la situa-

FIGURA 62 (izquierda) y FIGURA 63 (derecha)
Iteraciones en planta a partir del caso base

A través de desplazamientos en planta tanto de llenos (unidades residenciales) como vacíos (núcleos de escalera y terrazas) se conforman distintas situaciones capaces de variar la distribución del viento y su velocidad, lo que afecta directamente su desempeño como elemento de enfriamiento pasivo tanto al exterior como al interior de recintos.

Fuente: Imágenes de elaboración propia a través de Flow Desing





ción para departamentos en niveles bajos como se puede observar en las secciones pertenecientes a las últimas iteraciones de la figura 63

Posterior al ordenamiento en planta, se considera el efecto que posee la distribución de llenos (departamentos) y vacíos (terrazas, y núcleos de escaleras en iteración B1) en la componente vertical. Al igual que en planta, se pretende aumentar la variación de espacios vacíos y así permitir un mejor flujo de viento —de menor turbulencia y velocidad— en sección, comenzando por el caso base B1, que deriva de la iteración A4.

En A4, y a través de un modelo tridimensional de flujo de viento a 5 m/s (figura 64) se observa el contraste generado por volúmenes compactos de lleno y vacío: grandes sombras de viento con turbulencias, en compañía de altas velocidades entre aberturas. Implementando terrazas y disminuyendo la cantidad de núcleos en B1, se logra disminuir tanto la proporción de sombra como la velocidad de viento entre aberturas. Posteriormente en B2, se retiran los núcleos de escalera a fin de establecer un ritmo continuo de vacíos, observando un pequeño aumento de velocidad en todas las aberturas, mayor distancia de sombra de viento y cantidad de turbulencias.

Para corregir aquella situación, se establece una nueva posición de aberturas (en este caso, terrazas del conjunto) en B3, donde la sombra de viento disminuye considerablemente junto con la velocidad de salida y la cantidad de turbulencias. Estas son las características deseables para un edificio residencial cuyo flujo de viento se espera constante entre departamentos y fuera de ellos, permitiendo el recurso a unidades vecinas del conjunto, poniendo atención a los primeros niveles en donde se genera más turbulencia.

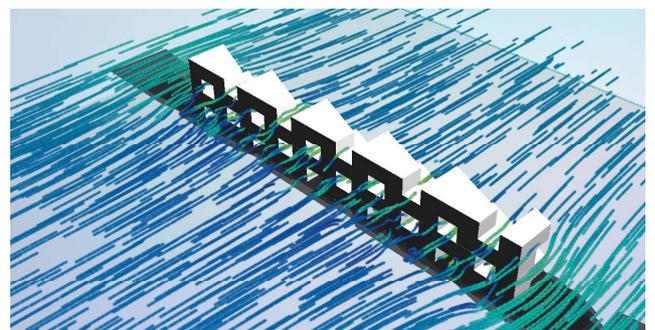
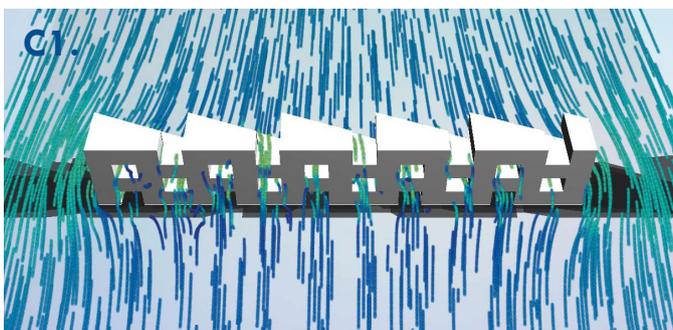
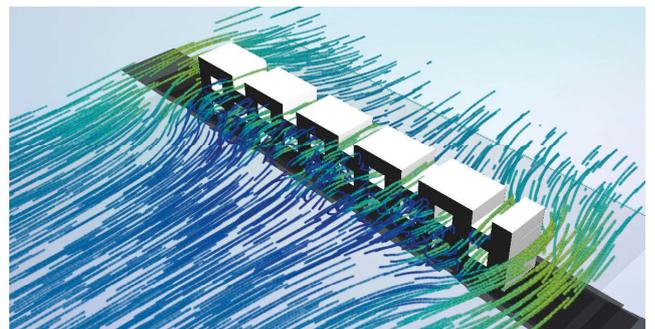
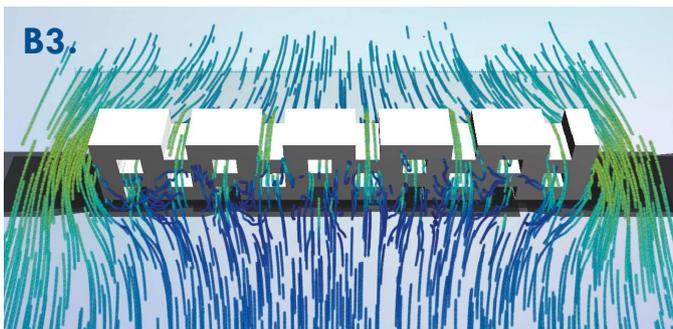
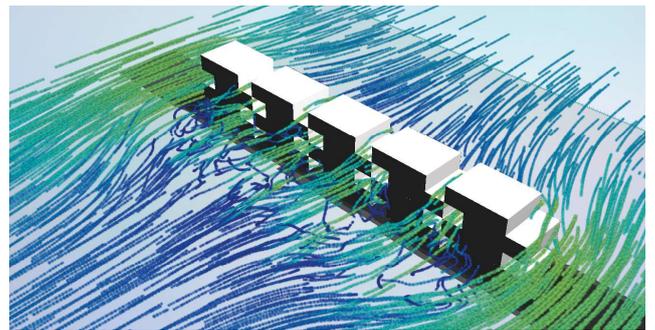
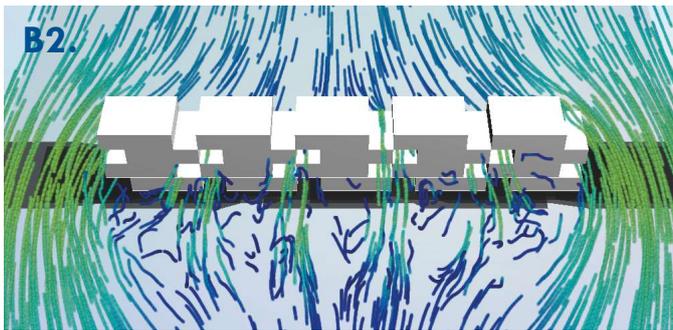
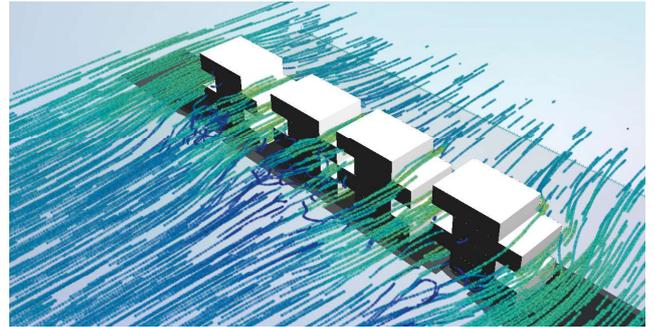
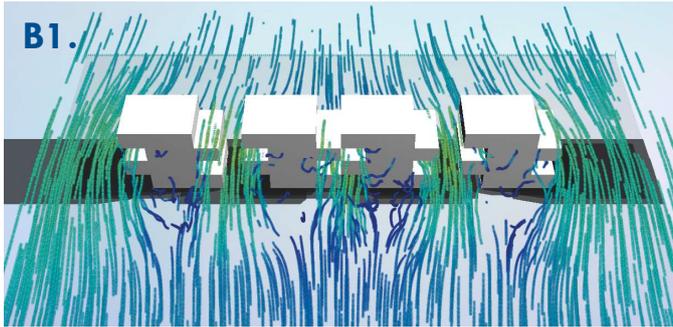
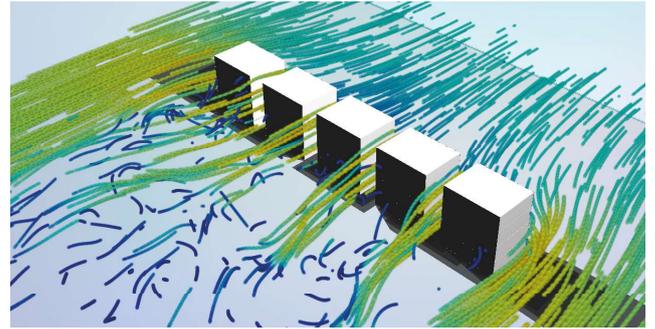
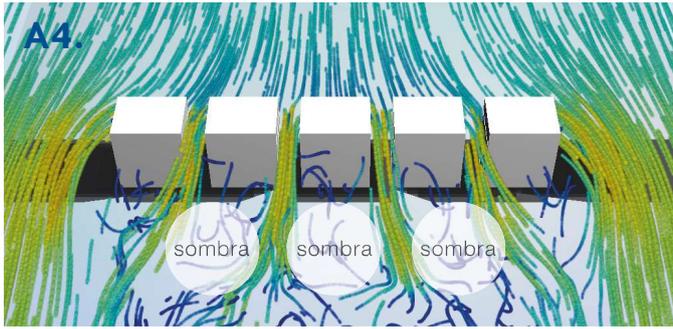
Finalmente en C1 (iteración a partir del caso B3) se observan las características de viento creadas en base a una sustracción del lleno —y formando una diagonal— a modo de evitar un encuentro perpendicular del viento con la estructura, lo cual se recomienda para muros construidos en tierra. A través de la operación y en modelo, se puede ver que se mantiene el comportamiento deseable anterior respecto a la distribución de viento, al tiempo que un leve aumento de velocidad en aberturas producto de una mayor presión disminuye la cantidad de turbulencias en primer nivel. De esta forma a su vez, conducir el viento incidente a tales espacios exteriores de departamento permite un aumento respecto al tiempo de confort que aquellos espacios son capaces de ofrecer a la sombra en días donde la temperatura aumenta y la velocidad del viento es menor, justamente porque logra elevar el valor de este último.

FIGURA 63 (izquierda) y FIGURA 64 (derecha)

Iteraciones en sección y ángulo

El mismo principio de distribución alterna en planta se implementa para el diseño en sección, permitiendo volúmenes cuya sombra de viento disminuye considerablemente.

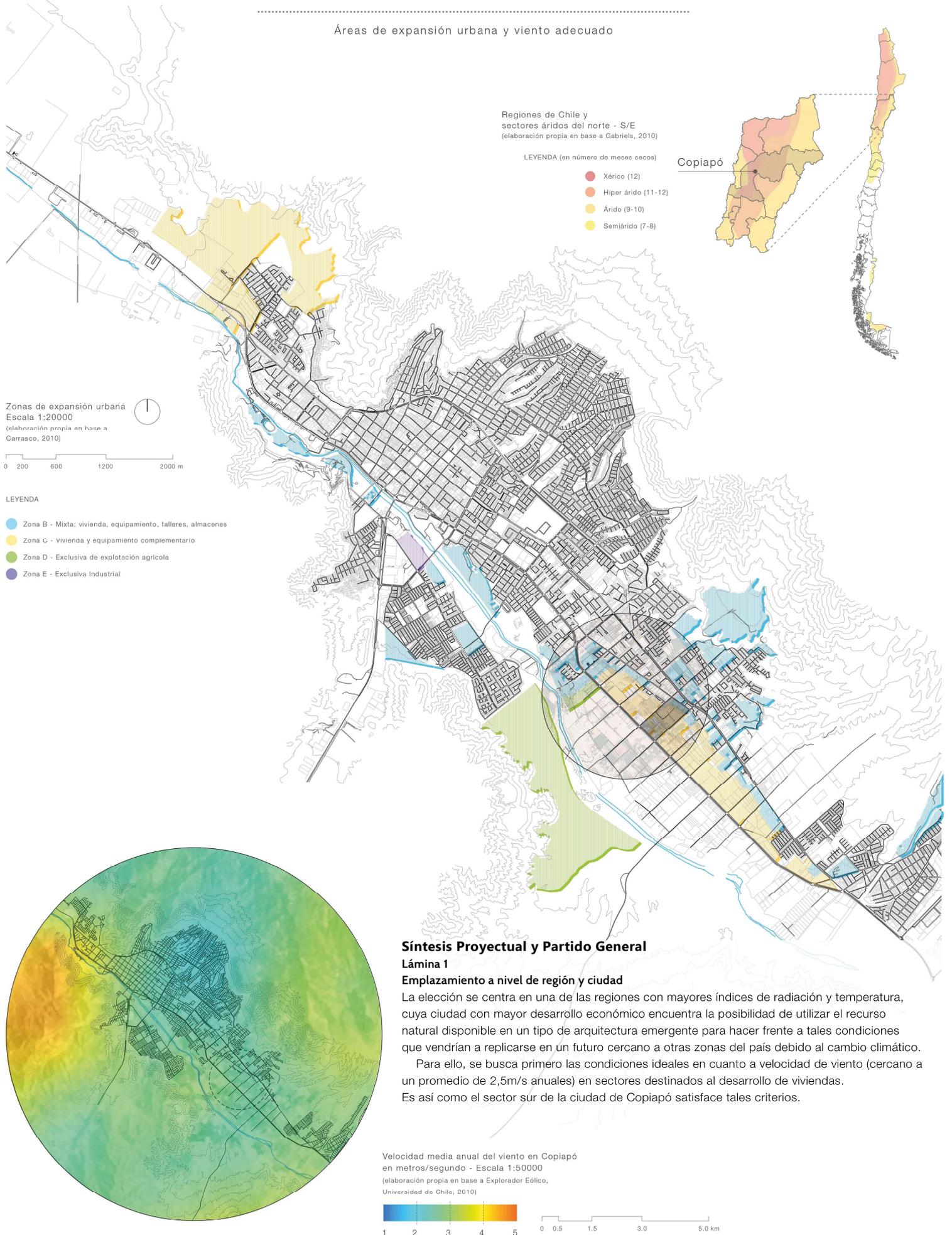
Fuente: Imágenes de elaboración propia a través de Flow Desing



Velocidad de viento en m/s

ESTRATEGIA A NIVEL DE CIUDAD

Áreas de expansión urbana y viento adecuado



ESTRATEGIA A NIVEL DE BARRIO

Ocupación alternada en serie



Sector de Copayapu

Escala 1:10000



0 100 300 600 1000 m



Manzana a intervenir

Escala 1:2500

0 25 75 150 250 m

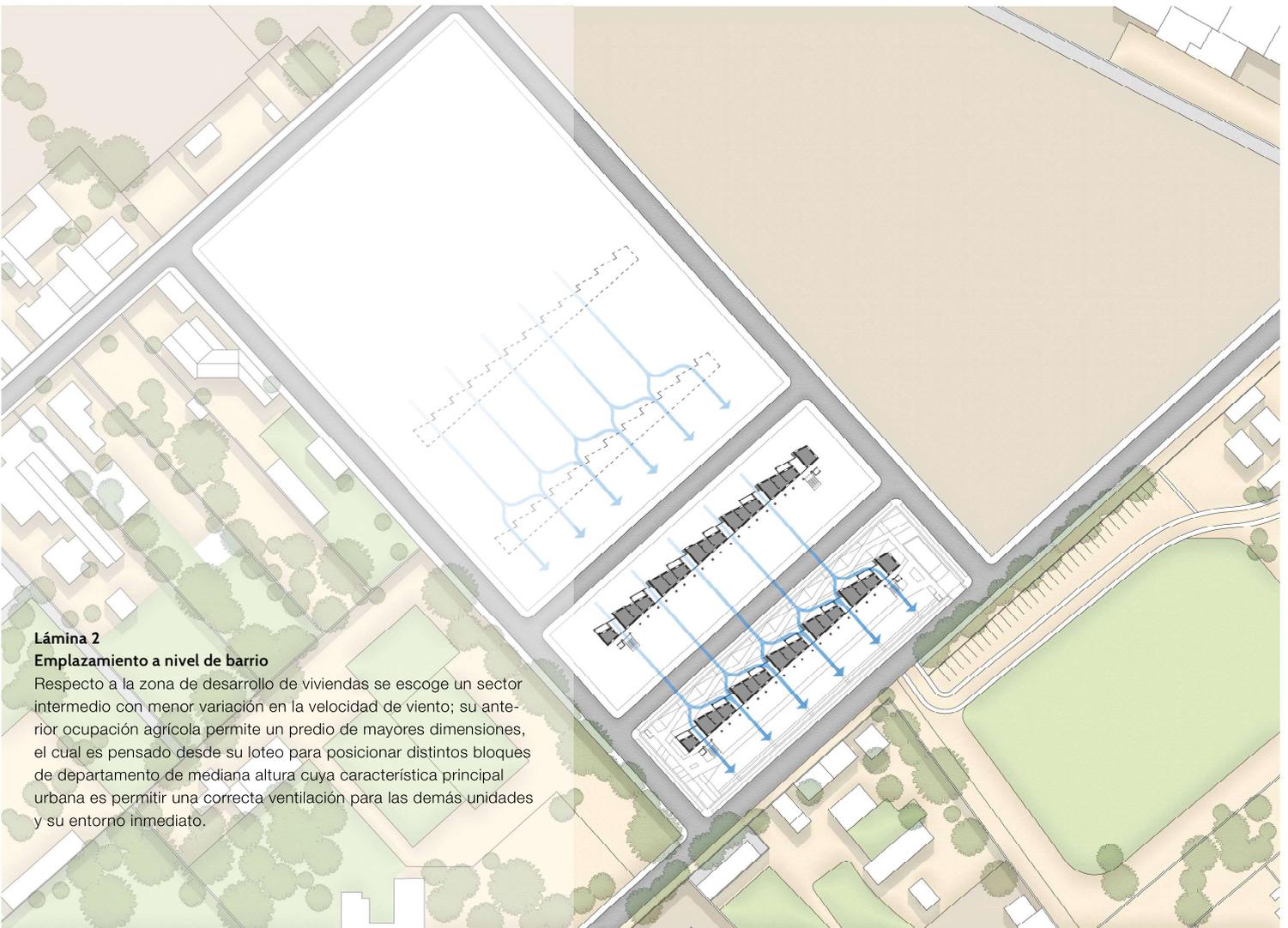


Lámina 2

Emplazamiento a nivel de barrio

Respecto a la zona de desarrollo de viviendas se escoge un sector intermedio con menor variación en la velocidad de viento; su anterior ocupación agrícola permite un predio de mayores dimensiones, el cual es pensado desde su loteo para posicionar distintos bloques de departamento de mediana altura cuya característica principal urbana es permitir una correcta ventilación para las demás unidades y su entorno inmediato.

Manzana intervenida

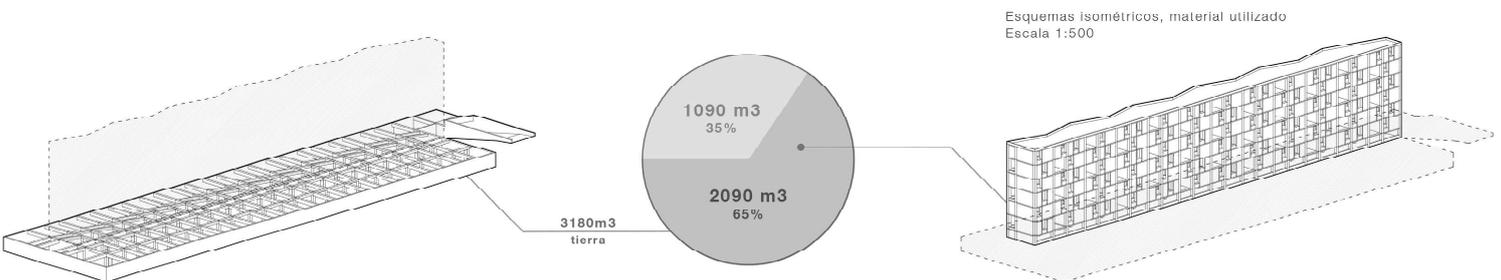
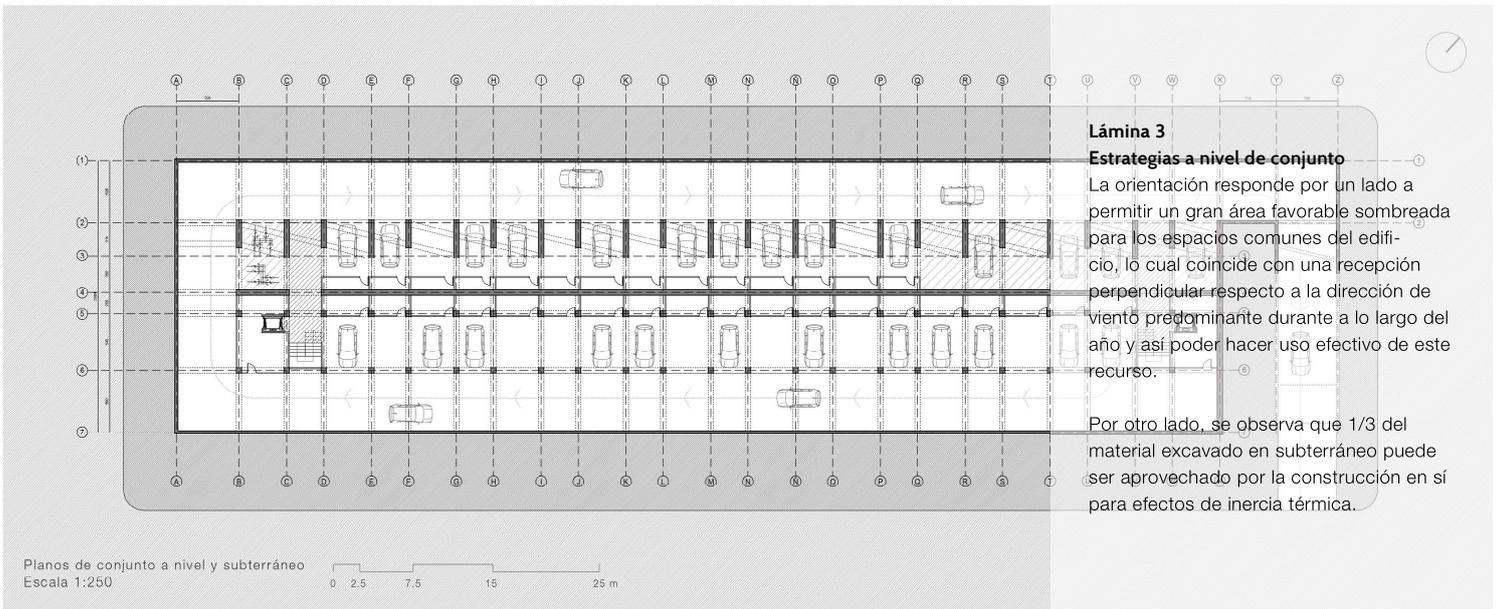
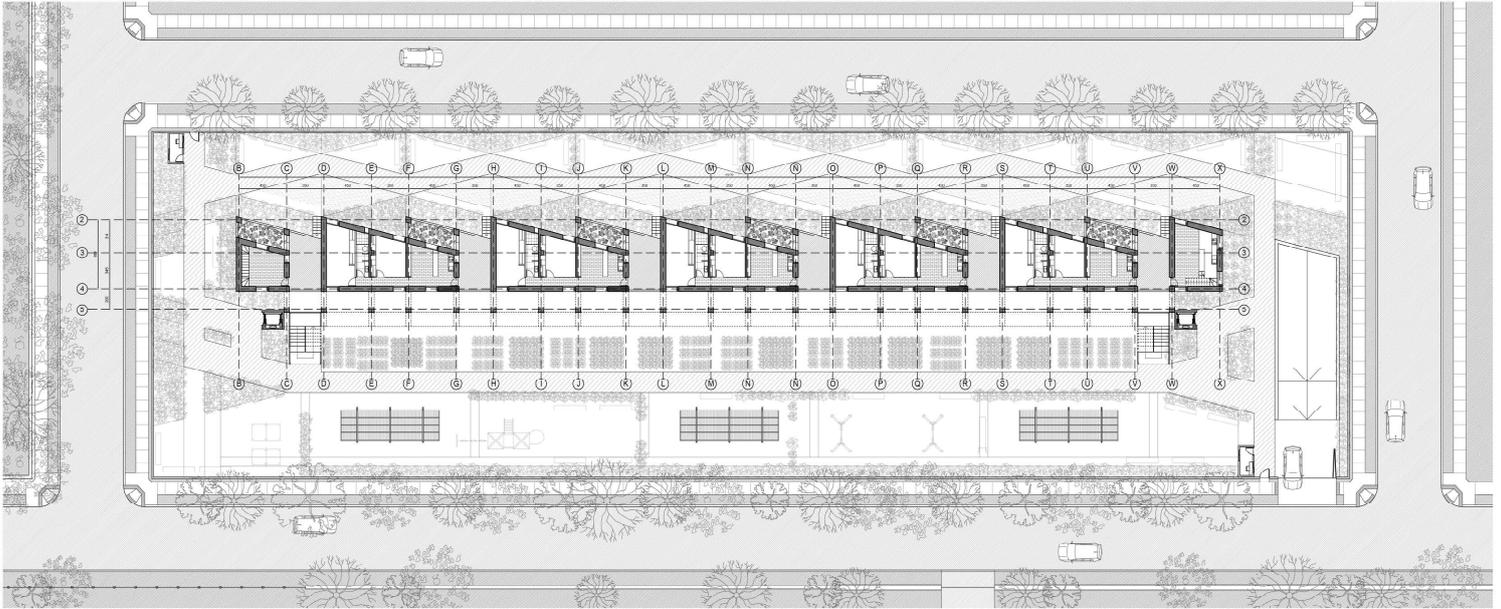
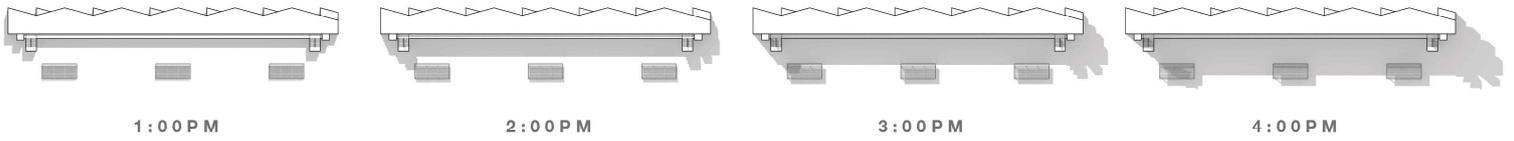
Escala 1:750

0 7.5 22.5 45 75 m

ESPACIOS DE CONJUNTO

Decisiones proyectuales a nivel

Proyecciones de sombra en solsticio de verano a distintas horas - Escala 1:7500



ESTRATEGIA A NIVEL DE DEPARTAMENTOS

Plano de departamento tipo
Escala 1:50



Espacios ventilados y sombreados

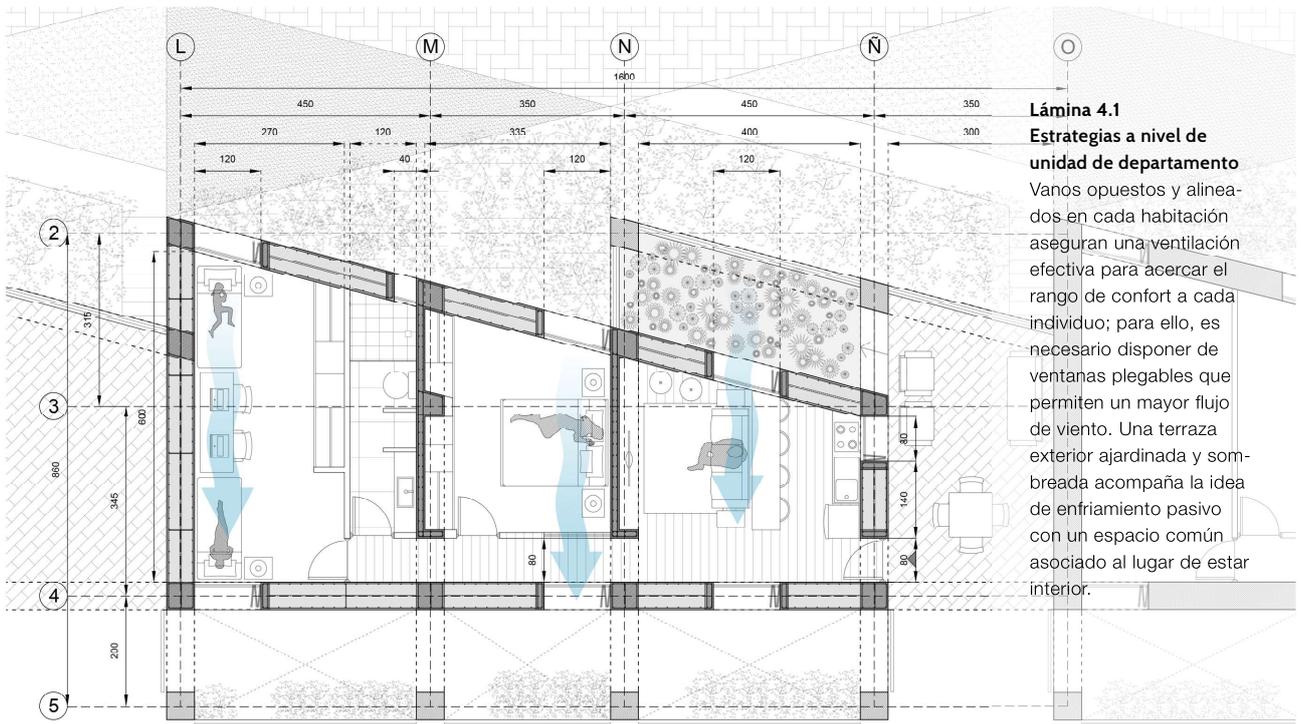


Lámina 4.1
Estrategias a nivel de unidad de departamento
Vanos opuestos y alineados en cada habitación aseguran una ventilación efectiva para acercar el rango de confort a cada individuo; para ello, es necesario disponer de ventanas plegables que permiten un mayor flujo de viento. Una terraza exterior ajardinada y sombreada acompaña la idea de enfriamiento pasivo con un espacio común asociado al lugar de estar interior.

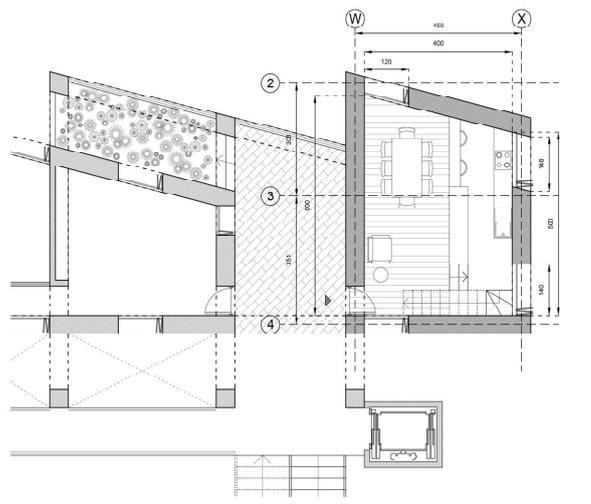
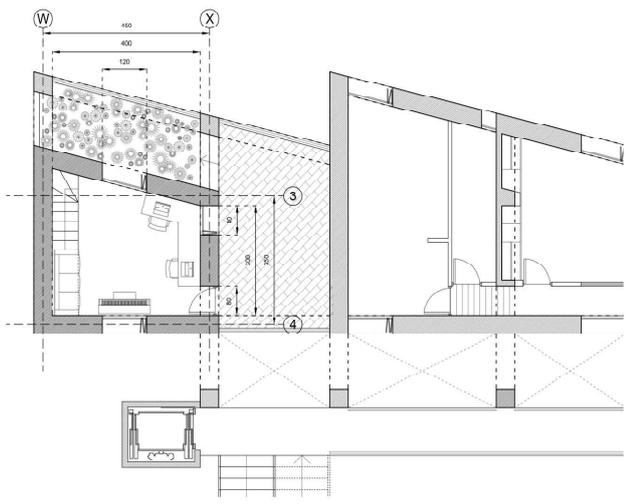
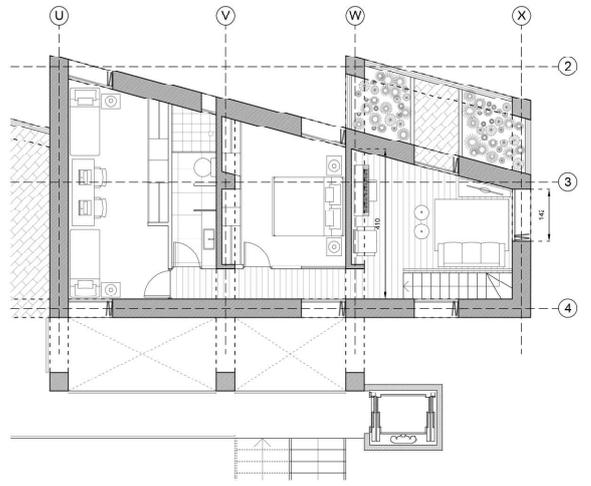
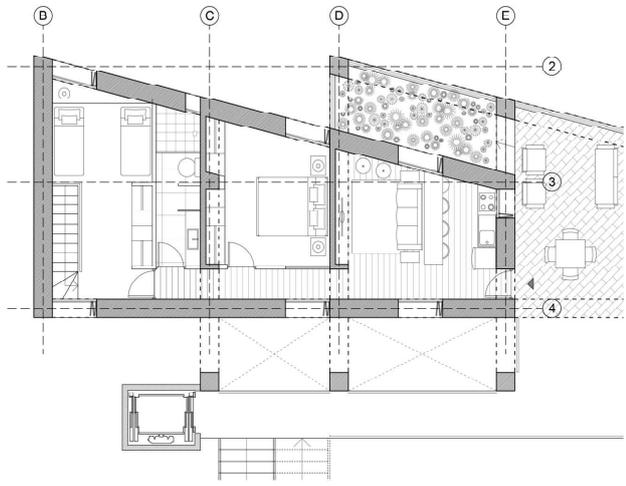




Lámina 5.1

Partido general en elevación noroeste

Se disponen celosías correderas para evitar el sol a lo largo del día en periodos cálidos mientras que a nivel existe un zócalo con aberturas a modo de permitir el flujo de viento a nivel del suelo en espacios comunes. Las unidades entre pisos se desplazan de forma alternada creando terrazas cuyo propósito es evacuar el calor acumulado por los muros durante el día.



Lámina 5.2

Partido general en elevación sureste

Por el lado de acceso se encuentran los paneles perforados que atenúan la vista hacia ciertos dormitorios y lugares de estar. La zona superior del edificio correspondiente al último nivel es pensado como un sector transitable disponible para el asoleamiento de los residentes en invierno. Este mismo principio aplica durante todo el año para los dispositivos fotovoltaicos instalados para satisfacer la demanda de iluminación en zonas comunes exteriores.

IMÁGENES OBJETIVO

Sector de acceso norponiente



IMÁGENES OBJETIVO

Sector de acceso suroriente



4. Conclusiones y trabajos futuros

A través de la necesidad que presenta Copiapó de densificar su zona urbana en la medida que la actividad minera cobra relevancia año tras año, se establece un potencial de no solo contar con una tipología capaz de mediar en el traspaso de casas a torres, sino de implementar estrategias basadas en el clima y el carácter geográfico local, en un intento de mejorar las condiciones de confort, muchas veces pasadas por alto en las actuales formas de construir a manos del mercado inmobiliario.

Para ello, se utiliza el enfoque de energía cero como punto atractivo no solo para usuarios, sino para la región en materia económica y ecológica de ser establecido en forma colectiva. Esto se logra a través de estrategias de diseño pasivo que ponen en relieve el carácter desértico local. La elección de la ciudad por otro lado representa la oportunidad de estudiar el desafío que el clima árido significa para la implementación de tales estrategias, en contexto de grandes amplitudes térmicas y un creciente índice de sequías.

Por medio de encuestas y observaciones en terreno se puede contar con un punto de partida, reconociendo no solo los problemas existentes en la vivienda actual de distinta tipología, sino las medidas que sus habitantes llevan a cabo de manera espacial, constructiva, y energética al utilizar sistemas mecánicos, para alcanzar el confort térmico interior. A partir de ello, se destacó la presencia de construcciones llevadas a cabo en adobe con grandes vanos en una estrategia que articula inercia térmica y ventilación para un favorable desempeño térmico de confort en periodos cálidos.

Es así, como se busca potenciar el desarrollo de ambas estrategias: por un lado a través del viento, conociendo su efecto sobre el cuerpo humano y el carácter espacial que debe adquirir una vivienda para articular el mismo de manera efectiva y en función de la temperatura ambiente. Y por otro, haciendo uso de un elemento con propiedades de inercia térmica presente en el mismo sitio al momento de construir: la tierra. El buen empleo de este último dependerá en gran medida de su composición en cuanto al tipo de partículas, variable de lugar en lugar, por lo que se recomienda contar con pruebas de laboratorio para determinar su correcta proporción para efectos constructivos. Es sabido sin embargo, que una mayor proporción de arena es lo que se espera para una de las técnicas más resistentes en contexto de sismos: la tierra apisonada.

A través de referentes contemporáneos en clima árido, se puede conocer el estado del arte de ambas estrategias, sentando las bases para un diseño pasivo en vivienda colectiva de mediana densidad junto con medidas que suelen acompañar la implementación de inercia y flujos de viento: lugares sombreados a partir de protecciones solares, y con presencia de humedad a través de material vegetal. Es así —y en consideración de las condiciones climáticas locales— que se plantea un conjunto de vivienda basado en la técnica del tapial o tierra apisonada y la ventilación cruzada en busca una compatibilidad para establecer el denominado *night cooling* o ventilación nocturna como forma de potenciar el confort interior haciendo uso del desfase térmico que provoca el material respecto a la temperatura exterior.

Diversas configuraciones espaciales se llevan a cabo con el objetivo de no solo asegurar el correcto funcionamiento de tales estrategias a nivel de vivienda en edificio de densidad media, sino que para establecer un uso equitativo del viento por parte del edificio en sí, y su entorno urbano.

Así, una distribución de unidades residenciales en altura de forma alternada respecto a aberturas que hacen las funciones de espacios exteriores, conformará la principal operación de diseño en volúmenes alargados de orientación norte que hacen uso efectivo de la ventilación cruzada.

Distintos estudios pueden llevarse a cabo en función de las estrategias establecidas para un correcto desempeño térmico de confort y por ende energético. Como se menciona anteriormente, la implementación del elemento tierra requiere de estudios que no solo investiguen la composición de suelo, sino su resistencia frente a sismos y por ende viabilidad frente a otros sistemas que podría resultar de menor complejidad. El viento por otro lado, en ocasiones posee desventajas tales como el material particulado o el efecto que puede producir la humedad relativa en interior a largo plazo.

La proporción de vanos surge también como una problemática a abarcar en relación a la cantidad de luz que ingresa al interior, al ser deseable contar con proporciones menores al ser un clima de gran amplitud térmica y a modo de contar con un método favorable de construcción en tierra apisonada (donde prima la razón de muro por sobre vanos).

Es de esta forma que se busca establecer un diseño acorde al clima árido, en respuesta al confort térmico interior para alcanzar un mejor estándar energético, y así acercar las estrategias bioclimáticas a una tipología intermedia entre la casa y la torre, en un contexto inmobiliario que posee gran responsabilidad sobre el desarrollo urbano que genera, desde el ámbito energético, ambiental, y finalmente identitario ligado la geografía en que se inserta.

5. Anexos

Pauta de encuesta descriptiva de tipo cerrado

Mediante esta se pretende crear un registro breve sobre las condiciones interiores de confort con énfasis en la materialidad y la estacionalidad. Al ser de tipo cerrado se presentan opciones predefinidas facilitando su cuantificación.

1. Género

2. Edad

3. Tipo de vivienda:

- casa 1 o 2 pisos
- departamento 1 o 2 pisos en bloque o torre

4. Número de habitantes

5. Materialidad:

- material ligero (estructura madera y revestimiento yeso-cartón)
- madera (estructura y revestimiento en madera)
- adobe y caña
- adobe y madera (estructura en madera cubierta en adobe)
- ladrillo
- ladrillo reforzado
- cemento
- concreto
- hormigón
- hormigón armado
- otra (especificar)

6. Tamaño aproximado de vivienda en superficie útil (presentado en intervalos de 10m²)

7. Cantidad de habitaciones:

- 1 baño, 1, 2, 3 dormitorios o más
- 2 baños, 1, 2, 3 dormitorios o más

8. Orientación

9. Tipo de suelo/terminación: (mediante entrevistas se determinó que en ocasiones afecta la percepción del usuario)

- cerámico
- piso flotante
- piso vinílico
- madera
- radier

10. Tipo de área exterior presente: (condiciones tales como techado, pavimentado, con o sin vegetación)

- antejardín
- patio trasero
- balcón

11. Número de especies vegetales presentes al interior de la vivienda (1-10)

12. Número de especies vegetales presentes al exterior (1-10)

13. Sensación térmica en verano al interior (de 1 a 5, 1: agradable, 2: ligeramente caluroso, 3: caluroso, 4: muy caluroso, 5: demasiado caluroso)

14. Rango de apertura de ventanas para ventilación en verano (de 0 a 3, 0: totalmente cerradas, 1: ligeramente abiertas, 2: medianamente abiertas, 3: totalmente abiertas)

15. Horario de apertura en verano a lo largo del día (en intervalos de 3 horas a partir de las 0:00 hrs)

16. Presencia de sistemas de enfriamiento: (en living, comedor, o dormitorios)

- ventiladores
- aire acondicionado
- red geotérmica

17. Sensación térmica en invierno al interior de la vivienda (de 1 a 5, 1: agradable, 2: ligeramente frío, 3: frío, 4: muy frío, 5: demasiado frío)

18. Presencia de equipos de calefacción: (en living, comedor, o dormitorios)

- calefactor eléctrico
- radiador
- estufa a leña
- estufa a gas
- aire acondicionado
- chimenea

19. Calidad de luz natural que ingresa al interior de la vivienda (de 1 a 5, 1: mala, 2: deficiente, 3: regular, 4: buena, 5: muy buena)

TABLA 1 - Características de vivienda y condición interior/exterior acorde a estacionalidad

	Edad	Tipo de vivienda	Materialidad	Orientación	Suelo/terminac.	Área exterior	Cond. int. verano	Cond. int. invierno	Luz natural
1	51 M	casa (1n-1p)	adobe y madera	Norte	vinílico	antejar. + patio	ligeram. caluroso	muy frío	regular
2	49 F	casa (2n-3p)	concreto	Norte	porcelanato	ant.+patio+bal.	ligeram. caluroso	muy frío	muy buena
3	40 F	casa (1n-6p)	ladrillo	Norte	cerámico	antejar. + patio	agradable	frío	muy buena
4	48 F	casa (2n-4p)	ladrillo armado	Norte	cerá. + flotante	ant.+patio+bal.	caluroso	ligeram. frío	muy buena
5	18 M	casa (1n-4p)	concreto	Noroeste	madera	antejardín	agradable	frío	regular
6	44 F	casa (2n-5p)	conc.+pan.yeso	Noroeste	piso flotante	antejar. + patio	caluroso	muy frío	deficiente
7	53 F	casa (1n-2p)	ladrillo armado	Noroeste	cerá. + flotante	antejar. + patio	cal. hacia patio	frío en 1er piso	buena
8	17 F	casa (2n-4p)	horm.+pan.yeso	Noroeste	cerámico	antejar. + patio	cal. en 2do piso	muy frío	regular
9	29 F	casa (2n-4p)	hormigón	Noroeste	cerá. + flotante	antejar. + patio	caluroso	frío	deficiente
10	37 F	dpto t. (13er-2p)	hormigón armado	Noroeste	cerá. + flotante	1 balcón	caluroso en tarde	frío	buena
11	42 F	casa (1n-2p)	madera+pan.yeso	NO - SE	cerámico	antejar. + patio	demasiado cal.	frío	buena
12	45 M	casa (1n-3p)	concreto	NO - SE	cerámico	antejar. + patio	caluroso	frío	regular
13	26 F	casa (1n-4p)	horm.+pan.yeso	NO - SE	cerámico	antejar. + patio	caluroso	frío	deficiente
14	64 F	casa (1n-5p)	hormigón	NO - SE	cerámico	antejar. + patio	caluroso	frío	muy buena
15	26 M	casa (1n-2p)	ladrillo	NO - SE	cerámico	antejar. + patio	muy caluroso	ligeram. frío	buena
16	24 M	casa (2n-4p)	ladrillo	NO - SE	piso flotante	antejar. + patio	agradable	frío	buena
17	50 M	casa (1n-4p)	ladrillo armado	NO - SE	cerámico	antejar. + patio	caluroso	muy frío	buena
18	67 F	casa (1n-4p)	ladrillo armado	NO - SE	cerá. + flotante	antejar. + patio	caluroso	muy frío	buena
19	15 F	casa (2n-4p)	ladrillo armado	NO - SE	cerámico	antejar. + patio	cal. en 2do piso	frío	buena
20	24 M	casa (2n-4p)	conc.+pan.yeso	Sureste	cerá. + madera	antejar. + patio	cal. en 2do piso	frío	deficiente
21	21 F	dpto b. (5to-5p)	hormigón armado	Sureste	cerámico	sin balcón	agradable	ligeram. frío	regular
22	28 M	dpto b. (4to-2p)	hormigón armado	Sureste	cerámico	1 balcón	caluroso	frío	regular
23	30 F	casa (1n-3p)	concreto	Suroeste	cerá. + flotante	antejar. + patio	agradable	demasiado frío	deficiente
24	68 M	casa (1n-5p)	concreto	Suroeste	cerámico	ant.+patio+bal.	agradable	frío	buena
25	40 F	dpto b. (1er-3p)	hormigón armado	Suroeste	piso flotante	1 balcón	agradable	ligeram. frío	buena
26	45 F	dpto t. (5to-3p)	hormigón armado	Suroeste	piso flotante	1 balcón	demasiado cal.	demasiado frío	buena
27	17 M	casa (1n-5p)	adobe y caña	SO - NE	cerá. + flotante	3 patios inter.	agradable	demasiado frío	buena
28	62 M	casa (2n-3p)	ladrillo	SO - NE	cerá. + madera	antejar. + patio	agradable	muy frío	regular
29	33 F	casa (2n-3p)	ladrillo	SO - NE	vinílico	antejar. + patio	caluroso	frío	buena
30	42 M	casa (2n-4p)	ladrillo armado	SO - NE	cerá. + flotante	antejar. + patio	agradable	frío	buena
31	38 F	casa (1n-2p)	horm.+pan.yeso	SO - NE	cerámico	antejar. + patio	caluroso	muy frío	deficiente
32	55 F	casa (2n-2p)	horm.+pan.yeso	SO - NE	cerámico	antejar. + patio	demasiado cal.	muy frío	regular
33	45 M	casa (1n-3p)	horm.+lad.armado	SO - NE	cerámico	antejar. + patio	caluroso	muy frío	buena
34	17 M	dpto b. (2do-3p)	hormigón armado	SO - NE	cerámico	1 balcón	caluroso	frío	buena
35	31 F	dpto b. (3er-1p)	hormigón armado	SO - NE	hormigón libre	sin balcón	agradable	ligeram. frío	buena
36	35 M	dpto b. (3er-3p)	hormigón armado	SO - NE	flotante y tapiz	1 balcón	caluroso	frío	buena
37	32 F	casa (1n-3p)	ladrillo	Noreste	cerámico	patio	cal. hacia acceso	muy frío	deficiente
38	18 F	dpto b. (3er-2p)	hormigón armado	Noreste	piso flotante	sin balcón	caluroso	frío	regular

Fuente: Elaboración propia en base a encuesta llevada a cabo para habitantes del sector. La información se encuentra ordenada por orientación, materialidad, y niveles para casas **n**: número de pisos; en departamentos se especifica el nivel respecto al edificio al ser todos de 1 piso, **p**: número de personas que habitan la unidad, **b**.: edificio bloque, **t**.: edificio torre, **antejar**.: antejardín. La demanda de enfriamiento y calefacción por unidad de equipo (1-3), son representados en tonos respectivos (azul - rojo):

enfriamiento: 1  2  calefacción: 1  2  3 

TABLA 2 - Valores de humedad relativa (%) promedio desde 2017 hasta la fecha

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem.	Octubre	Noviem.	Diciem.
Promedio máx.	73.0	76.1	77.6	80.4	82.3	83.6	83.3	83.4	78.8	77.9	74.0	70.4
Promedio	64.6	65.0	69.5	69.7	68.9	67.1	67.4	66.5	66.7	64.9	66.0	63.5
Promedio mínimo	57.2	54.8	58.5	53.3	37.1	26.6	30.4	30.3	39.4	40.0	41.1	45.5

6. Referencias

- Accuweather. (2019).** *El tiempo en Chile*. [Figura 8]. Recuperado de: <https://www.accuweather.com/es/cl/copiapo/52499/december-weather/52499?year=2018&view=list>
- Allard, F. (1998).** *Natural Ventilation in Buildings*. Reino Unido. James & James. Ltd.
- Álvaro, S. (2018).** *Bruselas fija el fin de la era de los combustibles fósiles en Europa en 2050*. En El País. Recuperado de: https://elpais.com/sociedad/2018/11/27/actualidad/1543348641_627346.html
- Aranda, M., Castro, A., Soto, N., Lacoste, P., Premat, E. (2012).** *Tapias y tapiales en Cuyo y Chile (Siglos XVI-XIX)*. [Figura 27]. Bogotá. SciELO. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-97632012000200003
- ASHRAE. (2016).** *Ventilación para una Calidad Adecuada del Aire Interior*. Estados Unidos. ASHRAE.
- ASHRAE. (2017).** *Handbook Fundamentals*. American Society of Heating. Estados Unidos. Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ArchDaily. (2010).** *Aloni / decaARCHITECTURE*. [Figura 56]. ArchDaily. Recuperado de: <https://www.archdaily.com/45925/aloni-decaarchitecture>
- ArchDaily. (2013).** *Casa Munita González / Arias Arquitectos + Surtierra Arquitectura*. [Figura 28]. ArchDaily. Recuperado de: <https://www.archdaily.com/379734/casa-munita-gonzalez-arias-arquitectos-surtierra-arquitectura/>
- ArchiExpo. (2020).** *Desert queen: a Tucson Mountain Retreat blends into the Arizona landscape*. [Figura 31]. Estados Unidos. Recuperado de: <https://trends.archiexpo.es/project-235511.html>
- Attia, S., Moeseke, G., Piderir M., Vivanco, F. (2019).** *Net Zero Buildings, A Framework for an Integrated Policy in Chile*. Sustainability. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/5/1494>
- Barnum, T., Crits, A., Davila, A., DiRuggiero, J., Florian, W., Jedynek, B., McKay, C., Robinson, C. (2013).** *Colonization patterns of soil microbial communities in the Atacama Desert*. [Figura 29]. Microbiome. BMC. Recuperado de: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3971613/?tool=pmcentrez#__ffn_sectitle
- Barreneche, C., Cabeza, L., Petrichenko, K., Serrano, S., Üрге-Vorsatz, D. (2015).** *Heating and cooling energy trends and drivers in buildings*. [Figura 2]. Recuperado de: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1364032114007151>
- Bloomberg. (2018).** *Unión Europea presentó su plan para reducir las emisiones a cero*. En La Tercera Pulso. Recuperado de: <https://www.latercera.com/pulso/noticia/union-europea-presento-plan-reducir-las-emisiones-cero/422091>
- Börgel, R. (1983).** *Geomorfología*. [Figura 29]. Santiago. Colección Geográfica de Chile. Ediciones Instituto Geográfico Militar.
- Bulo, V., Lacoste, P., Premat, E. (2014).** *Tierra Cruda y Formas de Habitar el Reino de Chile*. Talca. Universum.
- Bustamante, W. (2009).** *Guía de Diseño Para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social*. Santiago, Chile. Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- Camaño, A., Fariña, J. (2012).** *The Ecology and Natural History of Chilean Saltmarshes*. Santiago, Chile. Ediciones UC.
- Carrasco, P. (2010).** *Crecimiento Urbano de Copiapó: Causales, Patrones y Perspectivas*. Chile. Nodo Atacama. Recuperado de: https://issuu.com/nodo-atacama/docs/crecimiento_urbano

- Center for the Built Environment. (2019).** *Thermal Comfort Tool*. [Figuras 23 y 24]. California. Recuperado de: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>
- Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción. (2012).** *Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos*. Primera Edición. Chile. Gobierno de Chile.
- Clarke, L., Eom, J., Hodson, E., Horowitz, R., Kyle, P., Link, R., Mignone, B., Mundra, A., Zhou, Y. (2018).** *Effects of long-term climate change on global building energy expenditures*. [Figuras 1 y 2]. *Energy Economics*, vol. 72. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988318300112>
- Codoceo, F. (2013).** *Guía Urbana de Chile: Pueblos de Alto El Loa*. [Figura 27]. Plataforma Urbana. Recuperado de: <http://www.plataformaurbana.cl/archive/2013/05/03/guia-urbana-de-chile-pueblos-de-alto-el-loa/>
- Danso, H. (2018).** *Suitability of Soil for Earth Construction as Building Material*. Ghana. Department of Construction and Wood Technology, University of Education Winneba. Crimson Publishers.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2019).** *Servicios Climáticos*. [Figuras 3 y 4]. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/menuTematicoTemperaturas>.
- Dulal, D. (2015).** *Characteristic Properties of Cement-Stabilized Rammed Earth Blocks*. *Journal of Materials in Civil Engineering*.
- Durán, D. (2018).** *Patio-oasis como espacio de control ambiental para viviendas en zonas áridas*. Copiapó, Región de Atacama. (Tesis para optar al título de arquitecto y magíster). Pontificia Universidad Católica de Chile. Chile.
- Easton, D. (2007).** *The Rammed Earth House*. Estados Unidos. Chelsea Green Publishing Company.
- Energía Región. (2017).** *Región de Atacama, Sector Eléctrico*. Comisión Nacional de Energía. Recuperado de: <https://energia.region.cl/region/ATCMA>
- Energy In Time. (2017).** *A “Nearly Zero Energy” Standard by 2050 in EU, Half-Dream, Half-Reality*. [Figura 60]. Recuperado de: <https://www.energyintime.eu/nearly-zero-energy-standard-2050-eu-half-dream-half-reality/>
- Explorador Solar. (2019).** *Recurso solar y datos meteorológicos*. [Figuras 8, 9 y 10]. Recuperado de: <http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/>
- Fast Company. (2009).** *Living in the Desert and Barely Needing an AC*. [Figuras 69 y 70]. Recuperado de: <https://www.fastcompany.com/90439032/>
- Fathy, H. (1986).** *Natural Energy and Vernacular Architecture*. [Figura 32]. Estados Unidos. United Nations University.
- Gabriels, D., Santibáñez, F., Soto, G., Verbist, K. (2010).** *Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. [Figura 6]. Recuperado de: <http://documentos.dga.cl/PHI847.pdf>
- Gilmore, C. (1972).** *Popular Science*. Estados Unidos. The Whats New Magazine. Recuperado de: <https://books.google.cl/books?id=VoSGVoHRqZMC&pg=PA96&lpg=PA96&dq>
- Gobierno de Chile. (2018).** *Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile Sobre el Cambio Climático*. Chile: Ministerio del Medio Ambiente.
- Government of South Australia. (2019).** *Using and saving energy: Cooling*. [Figura 37]. Australia. South Australia. Recuperado de: <https://www.sa.gov.au/topics/energy-and-environment/using-saving-energy/cooling>

- Ingersoll, T., Koenigsberger, O., Mayhew, A., Szokolay, S. (1977).** *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*. Longman Group Limited Ed. Madrid. Paraninfo.
- Juliá, C., Maldonado, A., Montecinos, S. (2008).** *Características Climáticas de la Región de Atacama*. [Figura 7]. Chile: Ediciones Universidad de La Serena.
- Lama, M., Escobar, G. (2018).** *Manual de Profundización; Curso Instalaciones, Sistemas y Proyecto Arquitectónico, ISPA*. [Figuras 38 y 39]. Santiago, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos.
- León, J. (2017).** *La Chimenea Solar*. Tesis Doctoral. Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Lobos, M. (2017).** *Nociones de Sustentabilidad en el Patrimonio Vernáculo del Valle del Choapa*. [Figura 27]. Editorial Restauro. Recuperado de: <https://editorialrestauro.com.mx/nociones-de-sostenibilidad-en-el-patrimonio-vernaculo-del-valle-del-choapa/>
- Maniatidis, V., Walker, P. (2003).** *A Review of Rammed Earth Construction*. Reino Unido. Department of Architecture & Civil Engineering, University of Bath.
- Marchamalo, M., Rodrigo, B., Sanabria, J. (2012).** *Análisis del confort y el comportamiento higrotérmico de sistemas constructivos tradicionales y actuales en viviendas de Santa Ana-Ciudad Colón (Costa Rica)*. Vol. 64. Informes de la Construcción.
- Meteoblue. (2019).** *Mapa meteorológico de viento*. [Figura 14]. Recuperado de: https://www.meteoblue.com/es/weather-maps/copiap%c3%b3_chile_3893656?variable=wind_streamlines&level=surface&lines=none&mapcenter
- Ministerio de Energía. (2019).** *Explorador de Energía Eólica*. Universidad de Chile, departamento de Geofísica. [Figuras 15 a 21, 25 y 26]. Recuperado de: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>
- Minke, G. (2009).** *Building With Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. [Figura 30 y 36]. Berlin. Birkhäuser.
- Mofidi, S. (2007).** *Passive architectural cooling principles for arid climates*. Irán. University of Science and Technology.
- National Institute of Standards and Technology. (2010).** *Measurement Science Roadmap for Net-Zero Energy Buildings*. Workshop Summary Report. U.S.: Department of Commerce.
- Organización Mundial de la Salud. (2019).** *La intensidad de la actividad física*. Recuperado de: https://www.who.int/dietphysicalactivity/physical_activity_intensity/es/
- Pacheco, I. (2017).** *Una casa de barro contemporánea en el desierto de Atacama, Chile*. [Figura 28]. Abouthaus. Recuperado de: <https://about-haus.com/casa-de-barro/>
- Parlamento Europeo. (2019).** *La UE y el acuerdo de París: hacia la neutralidad climática*. En Noticias Parlamento Europeo. Recuperado de: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20191115STO66603/>
- Pereira, M. (2018).** *Ventilación cruzada, efecto chimenea, y otros conceptos de ventilación natural*. [Figura 56 y 58]. ArchDaily. Recuperado de: https://www.archdaily.pe/pe/889075/ventilacion-cruzada-efecto-chimenea-y-otros-conceptos-de-ventilacion-natural?ad_medium=gallery
- Plataforma Arquitectura. (2009).** *Hotel Tierra Atacama / Matías González + Rodrigo Searle*. [Figura 28]. Plataforma Arquitectura. Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-16425/hotel-tierra-atacama-matias-gonzalez-rodrigo-searle>

- Plataforma Arquitectura. (2011).** *Casa Rondolino / nottoscale*. [Figura 63]. Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-122516/casa-rondolino-nottoscale>
- Plataforma Arquitectura. (2012).** *Refugio en la Montaña Tucson / DUST*. [Figura 64]. Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-259640/refugio-en-la-montana-tucson-dust>
- Plataforma Arquitectura. (2016).** *Casa Swartberg / Openstudio Architects*. [Figuras 66 a 68]. Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/798152/casa-swartberg-openstudio-architects>
- Plataforma Arquitectura. (2017).** *Three Gardens House / AGI Architects*. [Figura 57]. Recuperado de: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/806345/three-gardens-house-agi-architects>
- Pierre-Louis, K. (2018).** *The World Wants Air-Conditioning. That Could Warm the World*. En *The New York Times*: (A), 11. Recuperado de: <https://www.nytimes.com/2018/05/15/climate/air-conditioning>
- Revista AD. (2017).** *Yves Saint Laurent Marrakech*. [Figura 60]. Recuperado de: <https://www.revistaad.es/lugares/galerias/abre-el-museo-yves-saint-laurent-en-marrakech/9653/image/650315>
- Sirewall. (2019).** *Structural Insulated Rammed Earth*. [Figura 34]. Canadá. Recuperado de: <https://sirewall.com/contact-us/>
- Sun Earth Tools. (2019).** *Posición del Sol*. [Figuras 11 y 12]. Recuperado de: https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es
- Timmerman, B.** *Tucson Mountain Retreat. Estados Unidos, 2012*. [Figura 31]. Architonic. Recuperado de: <https://www.architonic.com/es/project/d-u-s-t-tucson-mountain-retreat/5106021>
- TLCD Architecture. (2014).** *Rammed Earth Wall Rises at TLCD Project*. [Figura 35]. Recuperado de <https://www.tlcd.com/rammed-earth-wall-rises-at-tlcd-project/>
- U.S. Department of Energy. (2015).** *A Common Definition for Zero Energy Buildings*. U.S.: National Institute of Building Sciences.
- Wassouf, M. (2014).** *De la casa pasiva al estándar Passivhaus. La arquitectura pasiva en climas cálidos*. [Figura 61]. Barcelona. Editorial Gustavo Gili, SL.