



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Facultad de Arquitectura, Diseño y Estudios Urbanos

Escuela de Arquitectura

VALOR DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA EN VIVIENDAS URBANAS COMO DISPOSITIVO PARA ADAPTACIÓN PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO EN CONTEXTO DE SEQUÍA.

Caso de Casablanca, Quinta Región.

POR

SANTIAGO LARA BULNES

Tesis presentada a la Escuela de Arquitectura de la Pontificia Universidad
Católica de Chile para optar al grado académico de Magister en Arquitectura
Sustentable y Energía y Título profesional de Arquitecto

Profesores Guía

Javier del Río
Felipe Encinas

Santiago, Chile | Octubre de 2020

©2020, Santiago Lara Bulnes

© 2020, Santiago Lara Bulnes

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

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de la redacción de esta tesis, he recibido una gran cantidad de apoyo y asistencia.

En primer lugar, quisiera agradecer a mis compañeros de estudio Beltrán, Cristobal, Juan, Natasha, Paulina, Pipa y Rocío. Es gracias a su apoyo que esta tesis se haya podido completar.

También me gustaría agradecer a mis profesores guía, por su valiosa orientación a lo largo de mis estudios. Además, agradecer especialmente a mi profesora, Paula Martinez, cuya expertise fue invaluable en el desarrollo de esta tesis y me impulsó a darle a este proyecto una precisión y profundidad superior.

Por último, me gustaría agradecer a mis padres por su paciencia y apoyo constante.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	i
ÍNDICE	ii
INDICE DE TABLAS	iii
INDICE DE FIGURAS	iii
ABSTRACT	iv

INTRODUCCIÓN

Contexto	1
Definición del Problema	4
Preguntas	8
Hipótesis	8
Objetivo General	8
Objetivos Específicos	8
Metodología	8
Alcances	9

1. AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA

1.1 Captación de Agua lluvia	11
1.1.1 Arquitectura Vernácula	11
1.1.2 Valor de SCALL en Viviendas y Ciudades	12
1.1.3 Prácticas Internacionales y Nacionales	14
1.2 Factores, Técnicas y Métodos	16
1.2.1 Calidad del Agua	16
1.2.2 Usos para el Agua	18
1.2.3 Reciclaje de Aguas Grises	20
1.3 Caso Casa MM, OHLAB	22

2. CASABLANCA SEGÚN PLAN REGULADOR, CLIMA Y VIVIENDA

2.1 Casablanca	25
2.2 Clima	26
2.3 Vivienda	28
2.4 El Agua en Casablanca	30

3. LA CUBIERTA EN CASABLANCA

3.1 Parámetros y Diseño	33
3.2 Desempeño Vivienda con Sistema de Recolección	34
3.3 Desempeño Vivienda con Sistema Híbrido	38
3.4 Estrategias para Proyecto Conjunto de Viviendas	40

CONCLUSIONES	42
---------------------------	----

REFERENTES	43
-------------------------	----

ANEXOS

INDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: Proyecciones de demanda de agua para el año 2030	31
---	----

INDICE DE FIGURAS

FIGURA A: Mapa de vulnerabilidad ante amenazas climáticas 1984-2013	1	FIGURA 2.6: Casas típicas de Casablanca	28
FIGURA B: Zonas de catástrofe por causas hidrometeorológicas en 1984-2013	2	FIGURA 2.7: Casas típicas de Casablanca	29
FIGURA C: Promedios de precipitación en comunas	4	FIGURA 2.8: Casas típicas de Casablanca	29
FIGURA D: Número de declaraciones de zona de catástrofe entre los años 1984-2013 por región	5	FIGURA 2.9: Perfil de calle residencial en Casablanca	29
FIGURA E: Escenario de la variación de Temperaturas promedio en Chile en el próximo siglo	5	FIGURA 2.10: Promedios de consumos de agua en capitales del mundo	31
FIGURA F: Escenario de la variación de precipitaciones promedio en Chile en el próximo siglo	5	FIGURA 3.1: Variación en eficiencia de uso de agua lluvia (RUE) para usos exclusivamente no potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd	34
FIGURA G: Localidades con restricciones para su futura expansión por causas hídricas	7	FIGURA 3.2: Variación en eficiencia de ahorro de agua (WSE) para usos exclusivamente no potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd	34
FIGURA 1.1: Sistema de recolección de agua lluvia en Xochicalco al sur de Cuernavaca, México	11	FIGURA 3.3: Variación en eficiencia de uso de agua lluvia (RUE) para usos exclusivamente potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 300 lpcd	35
FIGURA 1.2: Cisternas de agua tradicionales de Esvaz, Irán	11	FIGURA 3.4: Variación en eficiencia de ahorro de agua (WSE) para usos exclusivamente potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 300 lpcd	35
FIGURA 1.3: Cisternas de la basílica de Constantinopla, Turquía	11	FIGURA 3.5: Variación en eficiencia de uso de agua lluvia (RUE) con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd	36
FIGURA 1.4: Paisaje del valle La Ligua con nuevas plantaciones de paltas en otoño del 2003	12	FIGURA 3.6: Variación en eficiencia de ahorro de agua (WSE) con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd	37
FIGURA 1.5: Paisaje de fig. 1.4 en invierno del 2015	13	FIGURA 3.7: Estimado de disminución de demanda de agua potable de la red, reemplazada con agua lluvia y aguas grises recicladas	38
FIGURA 1.6: Principales países con legislación o normas gubernamentales para la creación de sistemas de captación de agua lluvia	14	FIGURA 3.8: Estimado de disminución de demanda de agua potable de la red, reemplazada con agua lluvia y aguas grises recicladas	39
FIGURA 1.7: Componentes de sistema de captación de agua lluvia	16	FIGURA 3.9: Esquema de ciclo de uso de agua en una vivienda, utilizando agua lluvia, aguas grises y agua de la red	41
FIGURA 1.8: Esquema de componentes de sistema de captación de agua lluvia en proyecto de arquitectura	17		
FIGURA 1.9: División de porcentajes de usos de agua en viviendas	18		
FIGURA 1.10: División de porcentajes de usos por lugar en viviendas	19		
FIGURA 1.11: Esquema de sistema de reciclaje, desecho y uso de aguas	20		
FIGURA 1.12: Casa MM	22		
FIGURA 1.13: Esquema estrategias casa MM. Acumulación y uso de aguas	23		
FIGURA 2.1: Localización y carácter de nodo de la ciudad de Casablanca	25		
FIGURA 2.2: Esquema de actualización al plan regulador de Casablanca	25		
FIGURA 2.3: Temperaturas y precipitaciones en Casablanca entre 2010 y 2018	26		
FIGURA 2.4: Promedios de temperaturas y precipitaciones en Casablanca entre 2010 y 2018	27		
FIGURA 2.5: Casas típicas de Casablanca	28		

ABSTRACT

La Región de Valparaíso es una de las regiones de Chile más vulnerables al cambio climático de las próximas décadas. Hasta el día de hoy se han declarado todas sus comunas continentales como zona de catástrofe debido a su continua escasez hídrica y toda la zona centro-norte de Chile se encuentra en un periodo de mega-sequía desde hace más de una década.

La ciudad de Casablanca es un caso valioso para estudiar formas de adaptar las viviendas a las consecuencias que provocará el cambio climático en la Región de Valparaíso en las próximas décadas ya que su cercanía a la costa y lejanía de las zonas más áridas de la región genera una condición climática más favorable que la del resto de la región. En este sentido, su humedad relativa y precipitaciones son mayores que el promedio de Valparaíso y las corrientes marinas permiten que en los peores escenarios climáticos, su aumento de temperatura sea relativamente bajo.

En este contexto, la comuna de Casablanca espera tener un aumento de población en los próximos años, sin embargo, como se menciona en la actualización al plan regulador de la comuna, existen localidades que tendrán que detener su desarrollo previo al año 2035 o encontrar fuentes secundarias de agua debido a que éste supera la oferta actual de agua para la comuna y viviendas quedarían sin acceso a agua potable.

Esta investigación busca resaltar la importancia de la integración de los sistemas de captación de agua lluvia en las viviendas de climas semi áridos como dispositivo para ahorro de agua con el fin de poder argumentar que es posible reducir la demanda de agua en las viviendas de Casablanca en un alto porcentaje y lograr aligerar el déficit de demanda que existe el día de hoy en la región.

Los resultados de la investigación demuestran que si se incorporan sistemas de recolección de agua al diseño de nuevas viviendas construidas, la demanda de agua en viviendas de la comuna de Casablanca se puede ver reducida en un rango de 25% a 50%, que se puede ver incrementado con estrategias de ahorro secundarias y las viviendas tendrían una fuente secundaria sostenible de agua, disminuyendo la demanda total de agua potable de las redes actuales y aumentando la oferta de agua en un porcentaje significativo.

Palabras Clave | sequía, viviendas, agua, lluvia, captación, sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

Contexto

La Quinta Región de Valparaíso es la segunda región más poblada de Chile, después de la Región Metropolitana y uno de los centros de agricultura más importantes del país (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2017). Se distinguen cuatro climas en la región (Biblioteca del Congreso Nacional [BCN], 2019):

1. Clima de estepa cálido que comparte con la Cuarta Región al norte del río Aconcagua con altas oscilaciones térmicas, un promedio de 15° de temperatura y bajas precipitaciones.
2. Clima templado tipo mediterráneo costero que se presenta por la mayoría del borde costero llegando hasta los valles interiores. El contacto con el mar disminuye la oscilación de temperatura manteniendo el promedio de 14°. Tiene un promedio de 450 mm de precipitación anual y un promedio de humedad relativa alta.
3. Clima templado tipo mediterráneo cálido principalmente al sur del río Aconcagua. Se caracteriza por su alta oscilación de temperaturas, promediando en 15.5° y por ser más seco, teniendo bajo volumen anual de precipitaciones.
4. Clima frío de altura a 3,000 metros en la Cordillera de los Andes. Predominan las bajas temperaturas y las precipitaciones sólidas abundantes.

Sin embargo, la zona central de Chile se encuentra en un periodo de mega-sequía; según el estudio conducido por el ministerio de agricultura del 2016, 8 de los 10 años anteriores habían tenido un total de precipitaciones anuales bajo el promedio (Santibañez, 2016). Durante este periodo se han visto en la Región de Valparaíso un descenso pluviométrico en aproximadamente 60% y del agua en los embalses en un 56% (BCN, 2012). Esta agua es utilizada en riegos, como agua potable y para la generación de energía y el agotamiento de estas reservas presenta un gran problema ante el constante aumento de la población y agricultura. Además,

durante las últimas décadas, la Quinta Región ha sido una de las regiones que concentra la mayor cantidad de eventos climáticos extremos, entre ellos sequías, temporales y heladas. Todo esto ha provocado que la Región de Valparaíso sea una de las regiones más vulnerables al cambio climático del país (Henríquez, Aspee & Quense, 2016). La *fig. a* muestra los resultados de la investigación dirigida por Henríquez et al. que calcula el índice de resiliencia que tiene cada comuna del país y en la *fig. b* se observa el número de eventos hidrometeorológicos que han causado una zona de catástrofe en cada región entre los años 1984-2013 registrados en la investigación del mismo grupo.

En el año 2011 se declararon 23 de las 36 comunas de la Quinta Región en situación de emergencia agrícola debido al déficit hídrico (BCN, 2012). La economía de la región depende en su producción de agricultura y la expansión de ésta en las últimas

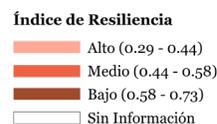
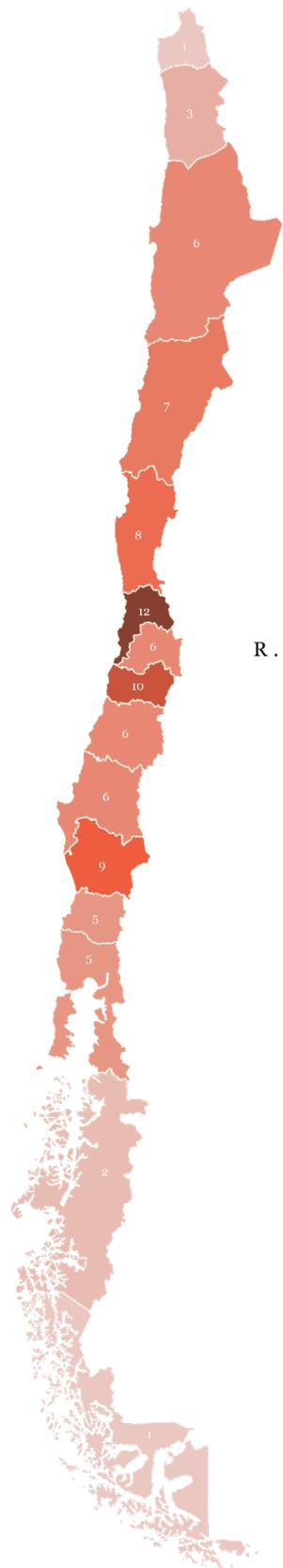


fig. a
Mapa de vulnerabilidad ante
amenazas climáticas 1984-2013.
(Henríquez et al., 2016)





Región	Lluvias	Sequías	Heladas	Nevadas	Aluviones
ARICA	1	0	0	0	0
TARAPACÁ	3	0	0	0	0
ANTOFAGASTA	6	0	0	0	1
ATACAMA	3	3	1	0	0
COQUIMBO	3	4	1	0	0
VALPARAÍSO	4	6	2	0	1
R. METROPOLITANA	3	2	0	0	0
L. B. O'HIGGINS	6	4	0	0	0
MAULE	4	1	0	0	1
BIO - BIO	4	0	0	0	2
ARAUCANIA	6	0	1	0	2
LOS RIOS	4	0	0	0	1
LOS LAGOS	4	0	0	0	1
AYSEN	1	0	0	0	1
MAGALLANES	0	0	0	0	1

fig. b
 Zonas de catástrofe por causas hidrometeorológicas en 1984-2013. (Elaboración propia desde información de Henríquez et al., 2016)

décadas ha incrementado la demanda de agua de manera exponencial al punto que supera la oferta del recurso hídrico (Budds, 2012). El norte de la región lleva este problema al extremo. Catorce de las comunas de la región, La Ligua, Petorca, Cabildo, Zapallar, Papudo, Limache, San Felipe, Catemu, Quillota, Los Andes, San Esteban, Panquehue, Calle Larga y Llay Llay fueron declaradas zonas de catástrofe en 2017. Durante el desarrollo de esta investigación se expandió el territorio declarado zona de catástrofe de estas iniciales 14 comunas a las 38 comunas continentales de la Región de Valparaíso (Intendencia de Valparaíso, 2019). La declaración de la región como zona de catástrofe designa al intendente regional de Valparaíso como autoridad responsable de la coordinación y ejecución de los programas de recuperación que el gobierno determine para las zonas afectadas, por lo que tiene acceso a más recursos

del Ministerio del Interior, por ejemplo los fondos para emergencias. El agotamiento de agua en estas comunas ha provocado que un porcentaje de la población no tenga acceso a agua potable y se ha tenido que establecer un sistema de camiones aljibe que transporta agua potable a estas poblaciones.

La ciudad de Casablanca se encuentra en una situación oportuna para caso de investigación dado el contexto de la crisis hídrica de la Región de Valparaíso y las características climáticas de la ciudad. Aunque Casablanca fue declarada zona de crisis agrícola en 2011, las precipitaciones podrían ser suficientes para lograr estudiar el valor de la recolección de agua lluvia en viviendas en zonas semi áridas y si es necesario, establecer un mínimo de precipitaciones para que esta estrategia sea viable.

Definición del Problema

El año 2015, la organización World Resources Institute [WRI] publicó un estudio de los países del mundo con mayor vulnerabilidad a tener estrés hídrico antes del año 2040. Chile se encuentra en el puesto 24 (Luo, Young, Reig, 2015), marcando la urgencia para encontrar estrategias para la conservación del agua.

El caso de Chile es muy particular, dado que se encuentra con graves problemas por escasez hídrica a pesar de ser uno de los países con mayor abundancia de agua dulce. El problema se concentra en dos factores: El agua esta repartida a lo largo del territorio nacional de manera muy desigual, de hecho, la mayor concentración de agua dulce se encuentra al sur de la Región del Maule mientras que hacia el norte, el territorio se vuelve más seco (*fig. c*). Esta característica se puede apreciar en el balance entre oferta y demanda de las regiones, donde en los últimos años, la demanda ha superado la oferta, mientras que en el sur se mantiene un superávit de agua bastante grande (*fig. d*).

Dentro de las regiones de Chile, la Región de Valparaíso tiene uno de los mayores índices de vulnerabilidad ante el cambio climático debido a la alta frecuencia de eventos

meteorológicos extremos (Henríquez et al., 2016). El clima de la zona es seco y si las ciudades no están concientes de los cambios que se espera que tenga el clima, es posible que algunas zonas tengan que detener su desarrollo y en casos extremos provocar migraciones debido a la falta de acceso a agua potable.

Los escenarios de predicción de cómo se verá afectada la zona sugieren que la temperatura aumentará en un promedio entre 1 y 2 grados (la temperatura mantiene un menor aumento que el promedio mundial gracias a la cercanía de todo el territorio chileno al mar) y que las precipitaciones disminuirán en un aproximado del 15% en los próximos 30 años (Bárcena, Prado, Samaniego & Perez, 2012). (*fig. e y f*)

En este contexto, los problemas que deberán ser tratados en las viviendas se asocian a la recolección de recursos renovables, principalmente el agua.

Específicamente a partir de este aumento de temperatura y disminución de precipitación se pueden predecir cambios puntuales que probablemente ocurrirán en la región (Santibañez, 2016):

- Disminución de precipitaciones en zonas costeras, principalmente.
- Disminución de número de días de lluvia.
- Aumento en la energía de precipitaciones.
- Aumento del contenido de vapor de aire.
- Aceleración de escorrentía por disminución de precipitación sólida.
- Aumento de evapotranspiración y requerimientos de riego.
- Posible disminución en recarga de napas.
- Disminución de frío invernal.



fig. c
Promedios de precipitación
en comunas.
(Elaboración propia en base
a información de Santibañez,
2016)

fig. d
 Número de declaraciones de zona de catástrofe entre los años 1984-2013 por región. (Henríquez et al., 2016)

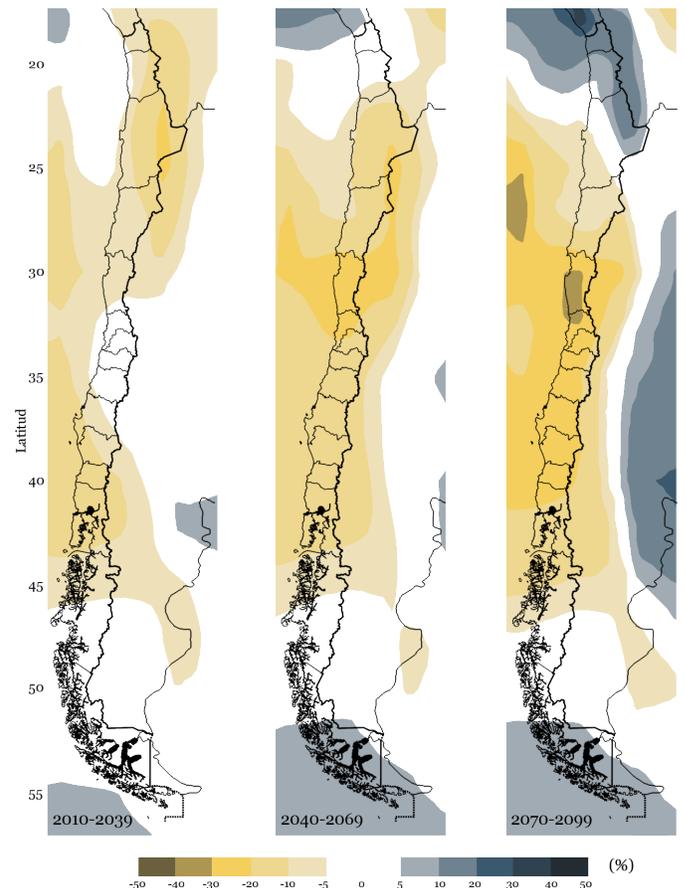
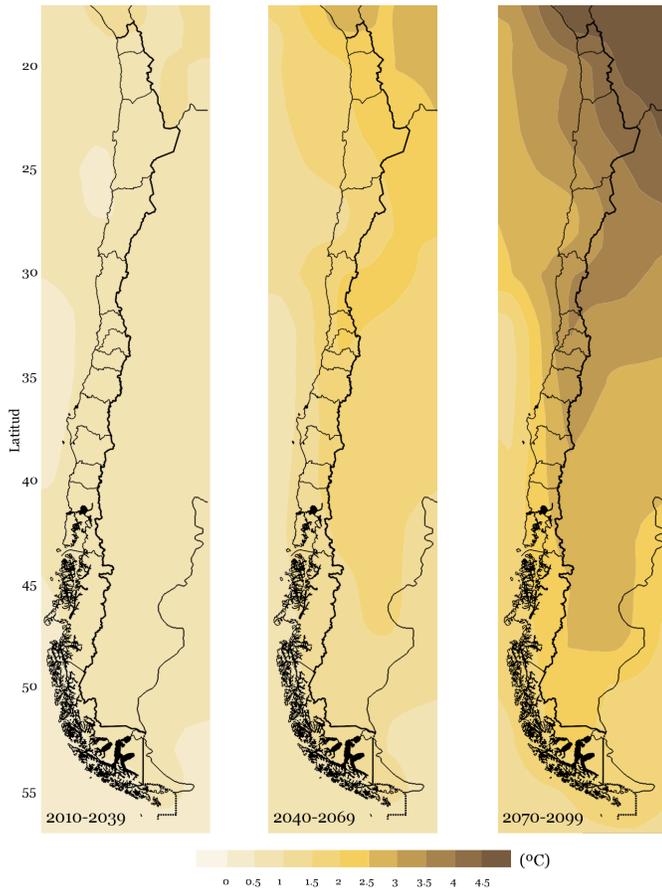
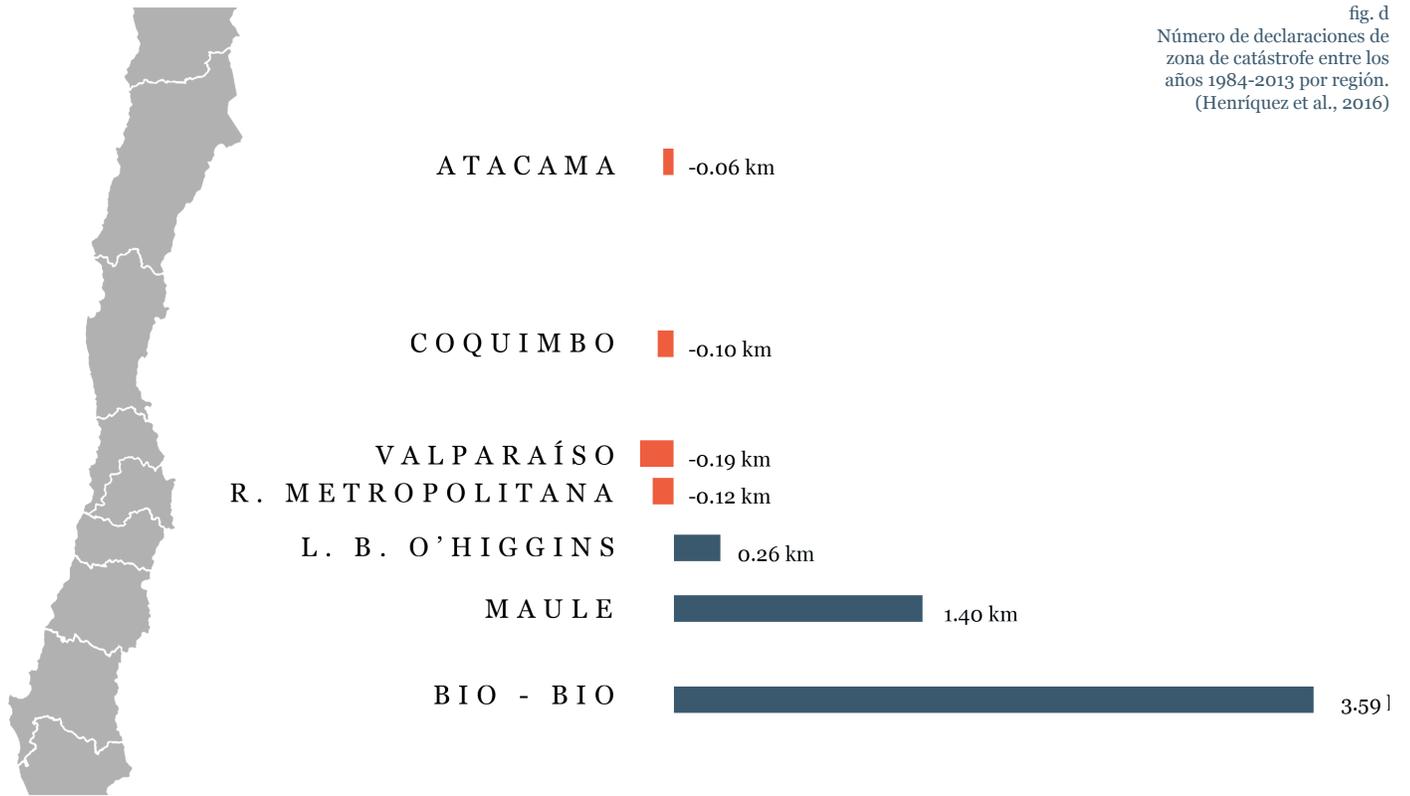


fig. e
 Escenario de la variación de Temperaturas promedio en Chile en el próximo siglo. (Comisión económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2012)

fig. f
 Escenario de la variación de precipitaciones promedio en Chile en el próximo siglo. (CEPAL, 2012)

La rápida expansión de la población de la Quinta Región, y por lo tanto de su producción agrícola, llevó a aumentar la demanda de agua en la región y ésta superó la oferta real del recurso de agua, por lo que varias localidades de la región han detenido su crecimiento por falta de instalaciones sanitarias que permiten el acceso a agua potable en viviendas.

El mayor problema actualmente es la falta de acceso a agua en algunas áreas de la región y se ha demostrado que es probable que este problema empeore en los próximos años. Se ha dicho que el carácter de este problema es inicialmente socio-político, donde Chile, siendo el único país con privatización del agua, algunas investigaciones proponen que esta organización pone la ganancia económica por sobre el bienestar humano y se ha puesto en cuestión el funcionamiento del

sistema de los “derechos de agua” (Budds, 2009; 2012; 2018). En la Quinta Región las aguas usadas son superficiales o subterráneas y se debe tener un derecho de agua para poder extraerlas y en las últimas décadas ha habido una repartición desmedida de permisos de agua sin tener en cuenta el efecto que tienen las extracciones ilegales en la oferta de agua y en los años más recientes con las sequías constantes de la región, se ha vuelto más difícil para agricultores de menores recursos tener acceso al agua. El agotamiento de las aguas superficiales ha provocado la disminución de aguas subterráneas por lo que si no se tienen recursos para construir pozos de profundidades de por lo menos 100 metros, se vuelve imposible acceder al agua, por esto las mayores empresas agricultoras son las que mejor pueden sobrellevar las sequías, desplazando a agricultores locales (Budds, 2009; 2012; 2018).

fig. g
Localidades con restricciones
para su futura expansión por
causas hídricas.
(Elaboración propia en
base a Municipalidad de
Casablanca, 2019)

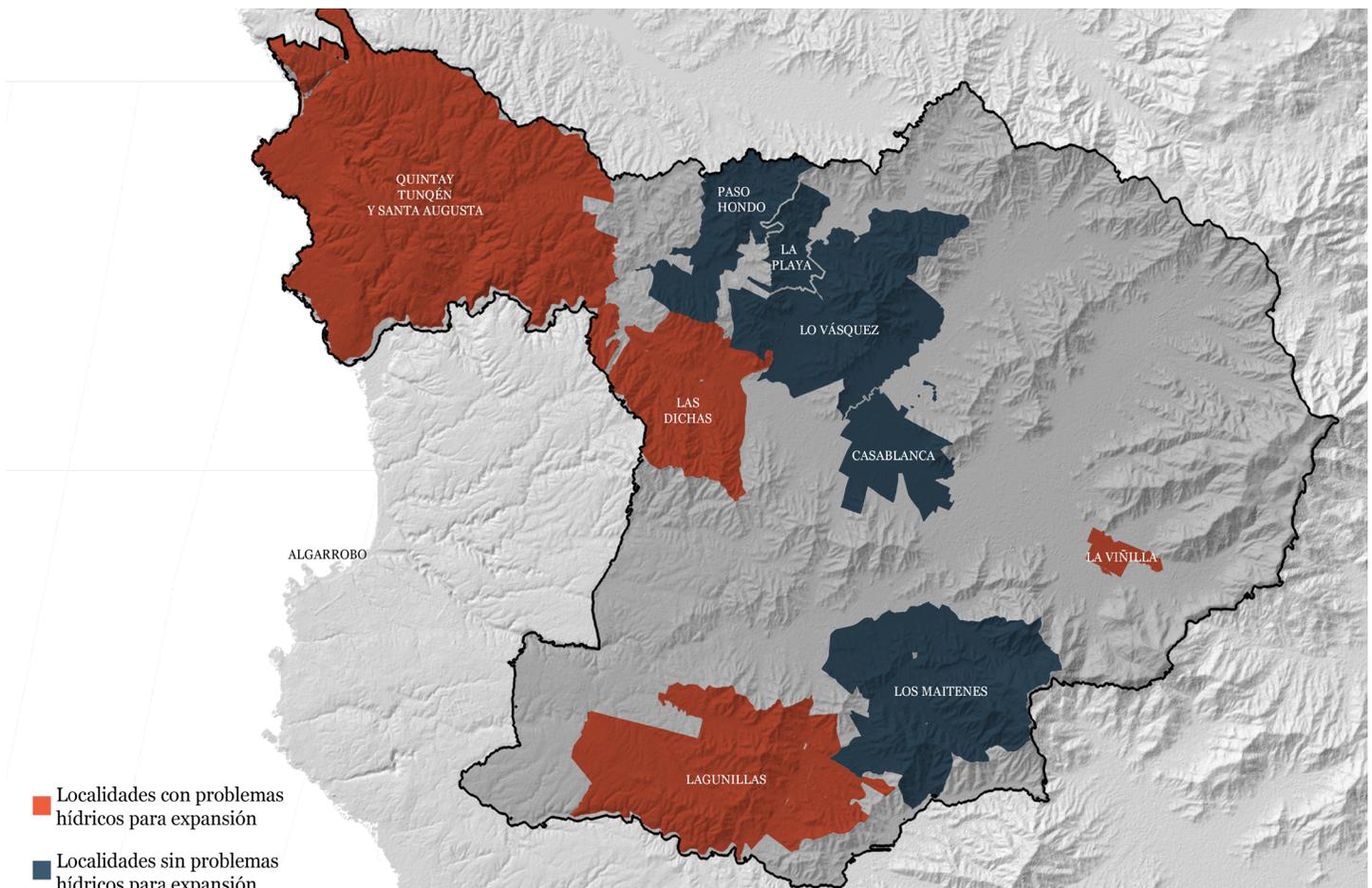
A su vez, debido al agotamiento del agua en la región, algunas poblaciones tienen que ser abastecidas por camiones aljibes, contratados a empresas privadas, y pueden llegar a vivir con 50 litros diarios por persona, lo que está muy por debajo del mínimo sugerido por la Organización Mundial de la Salud de 100 litros diarios (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2003; 2013).

En este contexto, se propone tomar como caso de estudio la ciudad de Casablanca ya que el problema aún no es tan extremo como lo es al norte de la región. Aun así, la sequía estará afectando el desarrollo de sus poblaciones en un futuro cercano y la ciudad concentra la mayor parte de la población de la comuna, por lo que es beneficioso explorar soluciones de manera temprana. El impacto que tendrá la prolongada sequía en la comuna se puede apreciar en la *fig.*

g, donde se muestran las localidades que la actualización al plan regulador de la comuna menciona que tendrán problemas en su futura expansión por falta de instalaciones hídricas.

La arquitectura puede proponer un alivio a la escasez de los recursos hídricos si se diseña en torno a la captación, acumulación y conservación de agua, teniendo en cuenta los futuros cambios en el clima de la región. En esta investigación se busca la viabilidad de una fuente alternativa de agua sustentable que se pueda integrar al diseño de las viviendas que serán desarrolladas en las próximas décadas en la Quinta Región, estudiando lo practicado en zonas áridas y semi-áridas en el pasado y las medidas que países desarrollados que sufren escasez de agua el día de hoy han adoptado para después analizar la posibilidad de integrarlo en Chile, con el fin de

disminuir la demanda de extracción de agua potable de las redes sanitarias de las viviendas y al mismo tiempo aumentar la oferta de agua en las mismas.



Preguntas

¿Qué incidencia tiene la recolección de agua lluvia en Casablanca a escala de la vivienda para responder a la sequía derivada del cambio climático?

¿Cuál es el potencial de reducir la demanda de agua potable a escala de conjunto de viviendas en Casablanca a través de implementar fuentes suplementarias de agua y re-usos de aguas grises en las viviendas?

En un clima semi-árido como el de Casablanca, ¿de qué manera se debe diseñar un sistema de captación de agua lluvia en un conjunto de viviendas para maximizar la oferta de agua, al mismo tiempo minimizar la devolución de agua a los alcantarillados de la ciudad?

Metodología

Las estimaciones de cambio climático se toman de estudios del Gobierno de Chile (2015; 2017), Naciones Unidas [UN] (2012) y la Universidad de Chile (2016), desarrolladas para establecer la vulnerabilidad de las regiones del país frente a los futuros cambios de clima y estudios de estrategias de mitigación en torno al riesgo del impacto en el país por dichos cambios en el ámbito económico e hídrico.

Teniendo un entendimiento de los problemas a los que se enfrenta la zona centro-norte del país se estudian las soluciones propuestas por otros países que están afrontando el mismo problema, a la vez que se estudian soluciones que se practicaban en la arquitectura vernácula para climas semi-áridos, con el fin de encontrar métodos alternativos a la extracción de agua potable de las redes municipales de recolección de agua. Después se definen los sistemas de captación de agua lluvia y los componentes que tienen, como también los factores que influyen en su funcionamiento, la pureza que puede alcanzar o contaminantes que pueda tener y los usos que se le pueda dar dentro de las viviendas. Además, se describe el valor agregado que

Hipótesis

La comuna de Casablanca podrá reducir la demanda de agua potable que tiene el día de hoy en un porcentaje significativo y mitigar las consecuencias del cambio climático si se empiezan a implementar sistemas de recolección de agua en los proyectos nuevos de vivienda.

Objetivo General

Proponer un nuevo ciclo de agua dentro de las viviendas de Casablanca, desde la extracción hasta la devolución al sistema de alcantarillados de la ciudad que aumenta la oferta con fuentes secundarias, utiliza el agua de manera eficiente y reduce los desechos al mínimo.

propondría el reciclaje de aguas grises en las viviendas, como estrategia suplementaria a la recolección de agua lluvia.

Se describe la comuna y ciudad de Casablanca, la población que reside y personas que se espera que lleguen y viviendas que se construyen actualmente, además de un análisis de la actualización propuesta para el plan regulador, donde se detallan problemas a los que se enfrenta el desarrollo de la comuna y se estudia el clima de la zona para tener una recopilación histórica de promedios de temperatura y precipitaciones que darán una imagen de la oferta de agua que se puede conseguir actualmente y una proyección de lo que estará disponible en un futuro. A continuación, se estudia la demanda actual de la ciudad como también el aumento que tendrá ésta en los próximos años con los datos de ESVL.

Finalmente, se estudian los factores que influyen en el diseño de los sistemas de captación de agua lluvia para que con los datos de la demanda de agua en las viviendas de la ciudad

Objetivos Específicos

- Realizar un recorrido histórico de los sistemas de captación de agua lluvia y determinar la importancia que tienen el día de hoy.
- Definir y cuantificar los requerimientos del recurso hídrico en las viviendas de Casablanca, además del aumento probable que tengan en los próximos años.
- Explorar los parámetros de diseño de un sistema de captación de agua lluvia en conjuntos de vivienda para ser optimizado frente al clima local y la demanda de las viviendas.

de Casablanca, se pueda tener un entendimiento de cuál es la superficie necesaria para abarcar un cierto porcentaje de agua en la vivienda y llegar a un resultado de cuál sería la oferta de agua que se podría alcanzar con la incorporación de estos sistemas en las viviendas de la ciudad a partir del método descrito por Mun & Han (2012) para analizar la efectividad de los sistemas de captación de agua lluvia y posteriormente concluir con estrategias que serían beneficiosas de incluir en el diseño de un conjunto de viviendas para optimizar la obtención, consumo y desecho del agua.

Alcances

Esta investigación se enfoca en el valor de los sistemas de captación de agua lluvia en viviendas urbanas como dispositivos de ahorro de agua para servir como fuente secundaria de agua en tiempos estivales y de sequía.

Se estudian propuestas de cubierta debido a que, en áreas urbanas densificadas es la superficie con mayor área disponible para la recolección de agua y de una calidad suficiente para necesitar tratamientos mínimos previos al consumo humano.

Potencialmente, se podría ampliar la investigación poniendo énfasis en el valor de los sistemas de captación de agua lluvia para áreas rurales ya que la menor densificación permite crear superficies mayores dedicadas a la captación de agua lluvia, sin embargo podrían aparecer otros factores que influyen en su funcionamiento como coeficientes de escorrentía de ciertos materiales y contaminantes que no se podrían encontrar en cubiertas de viviendas urbanas.

Por otra parte, esta investigación propone principalmente usos no potables para el agua recolectada en la vivienda posterior a un

tratamiento, sin embargo, debido a la gran contradicción de resultados sobre la pureza del agua recolectada en cubiertas que se desprenden del análisis bibliográfico, se debe realizar un extenso análisis para poder entender que tipo de tratamiento mínimo se le debe dar al agua para que sea seguro su consumo. Mientras algunas investigaciones afirman que puede ser utilizada como agua potable sin tratamientos anteriores, otros plantean que existe riesgo de contraer enfermedades por el consumo de aguas no tratadas. A pesar de esto, los autores están de acuerdo en que son muchos los factores que influyen en la pureza del agua lluvia de la región, como el tamaño de población en la que se encuentra la muestra, la cercanía a industrias de gran tamaño o a carreteras con tránsito continuo o la frecuencia de los días de lluvia y, por lo tanto no se puede asumir la pureza que tendría el agua en la Quinta Región.

La intención de esta investigación es dar evidencia el valor de los sistemas de captación de agua lluvia para ser una fuente suplementaria de agua en la vivienda que sea sustentable

e independiente, que el día de hoy está en déficit. Es por esto que es valioso conducir investigaciones complementarias a ésta, para escalas rurales, urbanas y en distintos climas y regiones del país para aumentar el conocimiento en un tema que esta siendo nuevamente valorado debido a las sequías masivas que están ocurriendo no solo en el país, sino en todo el mundo y cómo estas se han acelerado en las últimas décadas por la rápida expansión de las urbanizaciones. Con más información disponible sería de esperar que se empezaría a promover regulaciones para la instalación de estos sistemas en viviendas que dependen de ellas, siguiendo el ejemplo de muchos otros países desarrollados y en vías de desarrollo, beneficiando a los ecosistemas locales.

1. EL AGUA Y LA CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIA

1.1 Captación de Agua Lluvia

1.1.1 *Arquitectura Vernácula*

La práctica de la captación de agua lluvia es una estrategia que se utiliza desde los inicios de los asentamientos humanos. Existen evidencias de que en Jordania hace aproximadamente 9,000 años habían estructuras para la acumulación de agua lluvia, con fines de agricultura (Yannopoulos, Giannopoulou & Kaiafa-Saropoulou, 2019). En particular, se han encontrado restos de construcciones de cisternas en lugares de condiciones climáticas favorables para la recolección (islas tropicales) y en lugares de clima áridos, donde la ausencia de deshielos y de aguas subterráneas accesibles, además de una baja frecuencia y volumen de precipitaciones, ha causado que el desarrollo de técnicas de acumulación de agua lluvia sea la única forma de obtener un acceso permanente a agua. Estructuras pre-colombinas de acumulación de lluvia han sido encontradas en áreas de México sin cercanía a ríos o pozos, principalmente en áreas de la península de Yucatán, construidas por pueblos de influencia maya y hay evidencia suficiente para asumir que estos fueron construidos para

solucionar largos periodos de sequía (*fig. 1.1*) (Thomas, 1998, Pandey, Gupta & Anderson, 2003). En Medio Oriente se encuentran sistemas de captación de agua lluvia con miles de años de antigüedad que siguen siendo utilizados hasta el día de hoy. El caso de las cisternas de la ciudad de Evaz en Irán es particularmente destacable debido a que logra abastecer a la población de la ciudad con agua a pesar de estar ubicado en un clima con precipitaciones medias de 220 a 180 mm anuales (*fig. 1.2*) (Mirahmadi & Altan, 2018). En siglos más recientes en Europa, por otra parte, hay una gran variedad de estrategias de captación de agua lluvia a escala de ciudades y viviendas (*fig. 1.3*), y los usos varían, desde suplir la demanda de agua potable, hasta la climatización de las viviendas (Dili, Naseer, Varghese, 2010). Es por esto que se entiende que los pueblos nativos de varios países y ciudades que no tienen cercanía a aguas dulces han logrado habitar regiones que de otra forma serían inhóspitas a través de la acumulación de agua lluvia para sus viviendas.

fig. 1.1 a & b
Sistema de recolección de agua lluvia en Xochicalco al sur de Cuernavaca, México. (Mays, Antoniou & Angelakis, 2013, p. 1933)

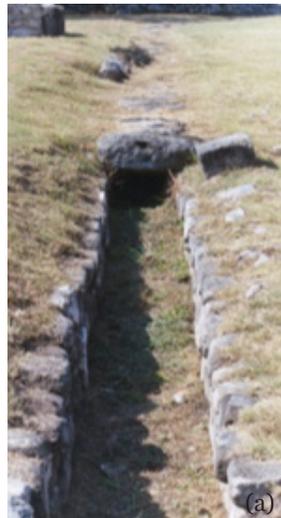
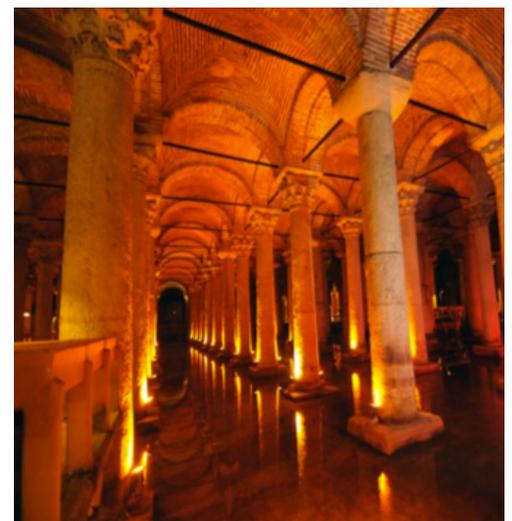


fig. 1.2
Cisternas de agua tradicionales de Esvaz, Irán. (Mirahmadi & Altan, 2018, p. 5)



fig. 1.3
Cisternas de la basílica de Constantinopla, Turquía. (Mays, Antoniou & Angelakis, 2013, p. 1929)



1.1.2 Valor de Sistemas de Captación de Agua Lluvia en Viviendas y Ciudades

Tras el desarrollo de instalaciones sanitarias, la captación de agua lluvia se volvió menos común y se prefirió suplir a las viviendas con una red comunitaria de agua tratada, ya que las aguas superficiales de ríos o lagos y subterráneas se presentaban como una mejor fuente para proveer a viviendas en ciudades de alta densidad y para las viviendas rurales con alta demanda de agua (Instituto Politécnico Nacional, 2010; Thomas, 1998). Yannopoulos et al., concluyen que el abandono de la captación de agua lluvia se debe principalmente a tres factores:

- Mejoras técnicas durante la era industrial, que facilitaba el transporte de agua a lugares remotos.
- La habilidad de conseguir agua desde acuíferos profundos para asegurar grandes cantidades de agua para industrias y urbes.
- La habilidad de manejar grandes cantidades de agua, constantemente y confiablemente a través de redes.

Sin embargo, los cambios climáticos locales del último siglo (la desertificación de zonas que bordean climas áridos), además de la rápida expansión de población que han tenido las ciudades y el aumento de las demandas de agua, han demostrado que, sin un entendimiento de la evolución de la demanda de agua en una ciudad, se pueden llegar a agotar los recursos de extracción, provocando que áreas pobladas hayan quedado sin acceso a agua potable. Este problema es especialmente recurrente en áreas rurales

de baja densidad de población que, sin embargo, tienen una alta demanda de agua (Santibañez, 2016; UNESCO, 2015). En las figuras 1.4 y 1.5 Budds pone en evidencia el fenómeno de desertificación ocurriendo el día de hoy en la zona centro-norte de Chile con fotografías del paisaje del valle La Ligua tomadas con 12 años de diferencia, donde se puede apreciar una clara reducción en la vegetación de los cerros (Budds, J., 2018).

La desertificación de zonas que bordean desiertos presenta un problema grave climático para las ciudades del país, ya que no sólo reduce la disponibilidad de agua para las ciudades que contaban con una mayor oferta de agua en décadas anteriores, sino que este fenómeno puede ser agravado por el alto porcentaje de superficies de hormigón en el entorno construido, que produce un peligroso aumento de la temperatura debido al fenómeno isla de calor y un aumento de las inundaciones por escorrentías altas durante tormentas, dado el alto coeficiente de escorrentía del hormigón, a diferencia del coeficiente bajo de suelos vegetales que absorben grandes volúmenes de agua de tormenta (Schmidt, 2006). Este aumento en el riesgo de inundaciones en ciudades ocurre también por uno de los cambios pronosticados para el clima en las próximas décadas, donde disminuyen los días de lluvia en un año, pero aumenta la intensidad de la misma en esos días.

Es por esto que, además de los beneficios que aporta el acumular el agua de lluvia para suplir la demanda de agua



fig. 1.4
Paisaje del valle La Ligua con
nuevas plantaciones de paltas
en otoño del 2003.
(Budds, 2018)

de la vivienda, hay un beneficio para la ciudad, ya que si se reduce la escorrentía total que tienen que recibir los acueductos de las ciudades (restando la escorrentía de las cubiertas de edificios que estarían utilizándolas para uso doméstico), disminuye también el riesgo de inundaciones (Montes, 2008; Mun & Han, 2012).

El desarrollo de sistemas de captación de agua lluvia presenta oportunidades muy valiosas para las viviendas en escalas rurales y urbanas, ya que pueden dotarlas con agua de manera sostenible y disminuyendo su dependencia a las redes municipales a través de la instalación de un sistema simple, de bajo costo y no perturbador al medio ambiente (UNESCO, 2015).

Es por esta razón que en las últimas décadas se han buscado nuevas fuentes secundarias de agua para las viviendas. Múltiples investigaciones han demostrado el potencial que puede tener la integración de sistemas de captación de agua lluvia en viviendas para aligerar la demanda de agua potable sobre las redes municipales o incluso como fuente única de agua para viviendas (Abdulla, Al-Shareef, 2009; Alam, Adeboye, Rayburg, Shanableh, 2012; Domènech, Saurí, 2011; Farreny et al., 2011; Ghisi, Leite, 2012; Hossein, Saghafian, Haghghi, 2013; Liuzzo, Notaro, Freni, 2016; Thomas, 1998), y desde los años 2000, instituciones gubernamentales de países alrededor del mundo han empezado a promover el desarrollo de sistemas de captación de agua lluvia en viviendas.



fig. 1.5
Paisaje de fig. 1.4 en invierno
del 2015.
(Budds, 2018)

1.1.3 Prácticas Internacionales y Nacionales

La práctica de la captación de agua lluvia reapareció en pequeños países situados en los trópicos o islas caribeñas alrededor del año 1930. Sin embargo, las principales construcciones e investigaciones que impulsaron su retorno a la arquitectura tuvieron lugar en Australia durante los años cincuenta. En los sesenta, se impulsó la investigación de métodos y materiales que pudieran acumular agua de manera confiable en Estados Unidos. Esta reaparición de los sistemas de captación de agua lluvia en los años cincuenta se debe principalmente a dos factores: el desarrollo y sofisticación de maquinarias y técnicas de recolección de agua y al rol que cumplirían estos sistemas en la descentralización del agua, además de su utilidad para mitigar riesgos de inundaciones y servir como reservas para emergencias en áreas altamente urbanizadas (Yannopoulos et al., 2019).

La investigación de Yannopoulos et al. (2019) hace un recuento de los principales países que hasta el año 2019 han impulsado el desarrollo e instalación de sistemas de captación de agua lluvia en sus edificaciones. Entre ellos, los gobiernos que han instaurado legislaciones y normativas que obligan o incentivan edificios con sistemas de captación de agua lluvia son (fig. 1.6):

- **Alemania**, se menciona como el principal país que impulsa el desarrollo de sistemas de captación de agua lluvia. El 35% de sus edificios nuevos incorporan sistemas de captación de agua lluvia y se incentiva a la instalación de sistemas en viviendas con la reducción de impuestos. Además, el Potsdamer Platz es uno de los ejemplos más notorios de proyectos sustentables de escala grande que incluyen la captación de agua lluvia en su funcionamiento, donde cumple con el objetivo de solo devolver el 1% de las aguas de tormenta a la red pública, por lo que el 99% de las aguas son utilizadas de diversas formas dentro del proyecto (Government of South Australia, 2009; Hermann Schmida, 1999).
- **Australia**, fomenta desde mitad del siglo XX el desarrollo de los sistemas de captación de agua lluvia. Obliga la instalación de sistemas en edificios grandes. Debido a las grandes sequías en el país, la captación de agua lluvia es una fuente complementaria a la red principal para aumentar la oferta de agua en áreas urbanas y ciertas áreas rurales dependen solamente del agua lluvia recolectada para suplir toda su demanda. Se estima que el 13% de las viviendas australianas utilizan sistemas de captación de agua lluvia como fuente primaria de agua potable. El sur-este del país obliga a todos los proyectos nuevos a incluir tanques para la acumulación de agua lluvia (Ahmed, Vieritz Goonetilleke & Gardner, 2010).
- **Bélgica**, en Flanders es obligatorio que edificios y viviendas nuevas tengan un sistema de captación, además todo edificio con más de 100 m² disponible

para captación debe incorporar un sistema (Environmental Agency UK, 2008).

- **Bermudas**, el país ocupa los sistemas como fuente principal de agua doméstica y es obligatorio que todos los edificios incorporen un sistema de captación de agua lluvia.
- **Brasil**, en el año 2007 el gobierno inauguró el proyecto “Un Milhão de Cisternas” que busca instalar un millón de cisternas que acumulan agua lluvia en el país (Gnadlinger, 2007).
- **Canadá**, abastece a las viviendas rurales sin acceso a redes públicas con sistemas de captación de agua lluvia. Además, se ha incentivado el desarrollo de proyectos de vivienda que logran suplir las necesidades hídricas con agua lluvia a partir de certificaciones de estándares sustentables.
- **Cataluña**, obliga a edificios nuevos y viviendas nuevas a incorporar sistemas de captación de agua lluvia, además de proveer subsidios económicos a proyectos antiguos que incorporen estos sistemas (Domènech & Sauri, 2011).

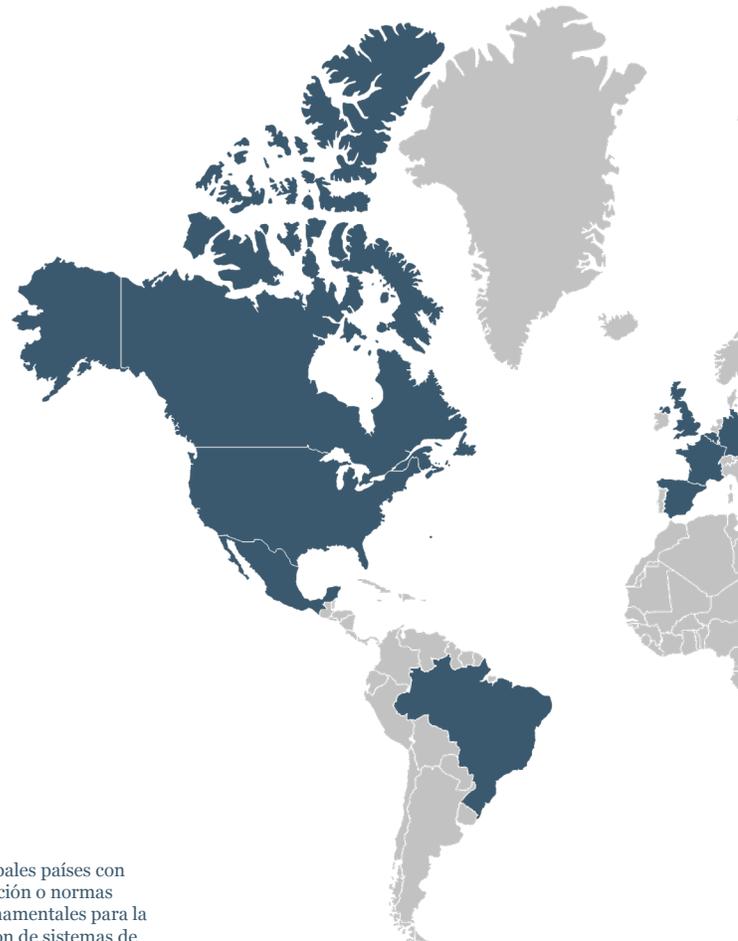
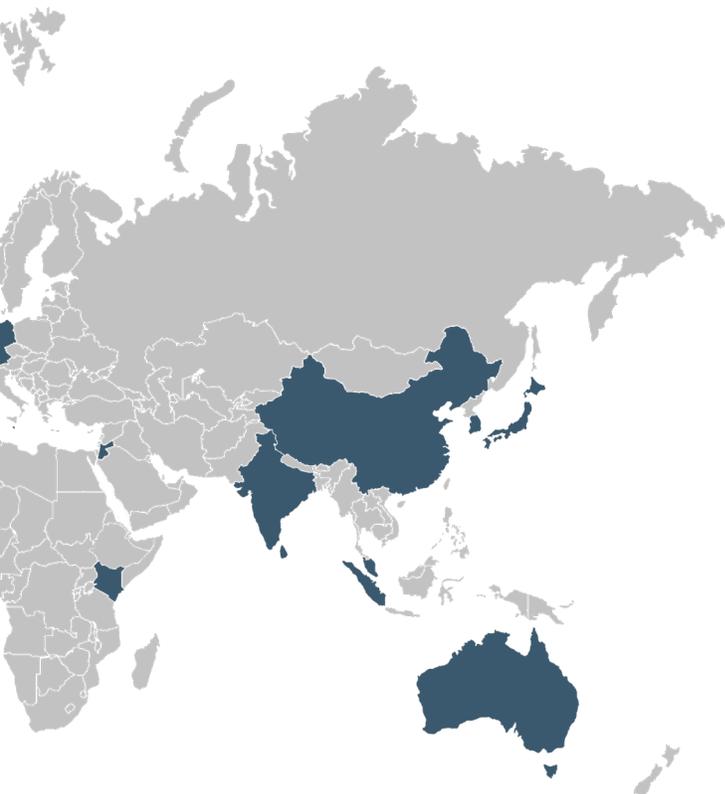


fig. 1.6
Principales países con legislación o normas gubernamentales para la creación de sistemas de captación de agua lluvia. (Elaboración propia en base a Yannopoulos et al., 2019)

- **China**, aumentó su interés en el desarrollo de estos sistemas después de grandes sequías que amenazaban la estabilidad de su agricultura durante los años ochenta.
- **Corea del Sur**, en Seúl es obligatorio que los edificios nuevos incluyan un sistema de captación de agua lluvia.
- **Estados Unidos**, principalmente en estados que tienen un clima árido o semi-árido, se obliga que los edificios tengan un sistema de recolección de agua. En otros estados se premia con reducir impuestos a viviendas que incluyan estos sistemas. Se calcula que en el año 2004 el país tenía 100,000 viviendas con un sistema de captación de agua lluvia en uso (Government of South Australia, 2009; Hermann Schmida, 1999).
- **Francia**, pasó una ley que reduciría los impuestos a las viviendas que incorporan sistemas de captación de agua lluvia en el año 2006.
- **India**, revive el interés por la práctica de captación de agua lluvia con la disminución de las aguas subterráneas por el aumento de la agricultura en el país durante los años sesenta. La incorporación de estos sistemas en proyectos es obligatorio en 18 de los 24 estados y 4 de las 7 regiones federales.
- **Japón**, hubo un gran interés por incorporar sistemas de agua lluvia en el país después de las sequías del año 1994 y el terremoto del 1995 para servir como reservas para emergencias. Se acercan a lograr que el 100% de las construcciones nuevas incluyan sistemas de captación de agua lluvia.
- **Jordania**, a pesar de tener un clima árido y bajas precipitaciones, obliga a la instalación de sistemas de captación de agua lluvia (Goonetilleke et al., 2005).
- **Kenia**, es uno de los países africanos con mayor historia en la práctica de recolección de agua lluvia y el gobierno ha impulsado la creación de un número de proyectos rurales de captación de agua lluvia desde los años setenta.
- **Malasia**, después de pasar una ley en 2006, se obliga a los proyectos grandes a incluir sistemas de captación de agua lluvia.
- **Malta**, se obliga a las cubiertas de edificios nuevos a funcionar como superficie para captar agua lluvia.
- **México**, el gobierno se ha enfocado en el desarrollo de proyectos de sistemas de captación de agua lluvia en varios estados que sufren sequías prolongadas. En zonas urbanas, se utiliza la recolección de agua lluvia para usos de limpieza e irrigación.
- **Reino Unido**, recientemente ha aumentado su interés en el estudio de sistemas de captación de agua lluvia. Existen aproximadamente 100,000 edificaciones con sistemas de captación y se construyen 4,000 cada año, con el fin de suplir las necesidades de riego y el llenado de escusados.
- **Singapur**, se ha interesado en la seguridad de sus fuentes de agua para la población y se estima que la mitad del territorio terrestre del país funciona para captar agua lluvia (Khoo, 2009).
- **Sri Lanka**, proyectos nuevos deben incorporar la inclusión de sistemas de recolección (Ministerio del Desarrollo Urbano y Suministro de Agua de Sri Lanka, 2005).
- **Taiwán**, para proyectos con una superficie mayor a 10,000 m² la recolección de agua lluvia debe suplir un mínimo del 5% de su demanda de agua.



En Chile, la sequía prolongada del periodo 2010-2014 ha llevado a las autoridades y organismos técnicos a considerar promover el uso de sistemas de captación de agua lluvia a una escala rural y, en casos relevantes, en zonas urbanas, para así poder contar con una fuente secundaria de agua en periodos estivales y sequías (UNESCO, 2015).

1.2 Factores, Técnicas y Métodos

Debido a que en asentamientos urbanos las cubiertas corresponden a aproximadamente el 50% de las superficies selladas en las ciudades, éstas son uno de los principales contribuyentes de escorrentía, por lo que presentan una oportunidad enorme de ser una fuente de dotación de agua para viviendas (Farreny et al., 2011).

Los componentes de sistemas de captación de agua lluvia son (UNESCO, 2015)(fig. 1.7 y fig. 1.8):

- Captación: la superficie destinada a la captación de agua lluvia.
- Recolección: tuberías y canaletas cuyo objetivo es recolectar el agua lluvia y conducirla hacia el interceptor.
- Interceptor: dispositivo que recoge el primer lavado de la lluvia que puede contener impurezas de diversos orígenes.
- Almacenamiento: depósito destinado a la acumulación, conservación y abastecimiento del agua lluvia con fines domésticos o productivos.

1.2.1 Calidad del Agua

Una de las ventajas más grandes que tiene la captación de agua lluvia para las viviendas no sólo es el reducido costo de la instalación de los sistemas (en comparación a otros métodos de extracción de agua), sino también la calidad de la misma. En promedio, se registra que la calidad del agua

que se puede recolectar en las cubiertas de las viviendas es más pura que las aguas superficiales y subterráneas, por lo que requiere de un menor tratamiento (Farreny et al., 2011).

Uno de los factores que más afecta el resultado de un sistema de captación de agua lluvia es la elección del material de la superficie destinada para la captación. Se han llevado a cabo numerosas investigaciones en cuanto a la relación de la calidad del agua recolectada y los materiales utilizados en la captación de ella (Ahmed et al., 2010; Islam, Chou, Kabir y Liaw, 2010; Meera, Ahammed, 2006; Ridder, Buishand, Reijnders, Hart y Slanina, 1985; Wilbers, Sebesvari, Rechenburg y Renaud, 2013). Los resultados de la investigación de Ahmed et al. (2010), resaltan la importancia de mantener una higiene básica en los componentes de los sistemas de captación de agua lluvia. Sugieren el lavado de las superficies de captación en las semanas antes a los periodos de lluvia y a la práctica de la desinfección del agua, ya sea hirviéndola o instalando sistemas UV de desinfección, antes de utilizar el agua utilizada como agua potable.

Los materiales más comunes para la captación de lluvia son los metales (inoxidables) y plásticos (policarbonato), ya que son los que producen agua con menor cantidad de contaminantes, además de tener un alto coeficiente de escorrentía (0.9-0.95). Les sigue a éstos las cubiertas de teja, hormigón y madera, que mantienen una proporción baja de contaminantes, pero con un menor coeficiente de

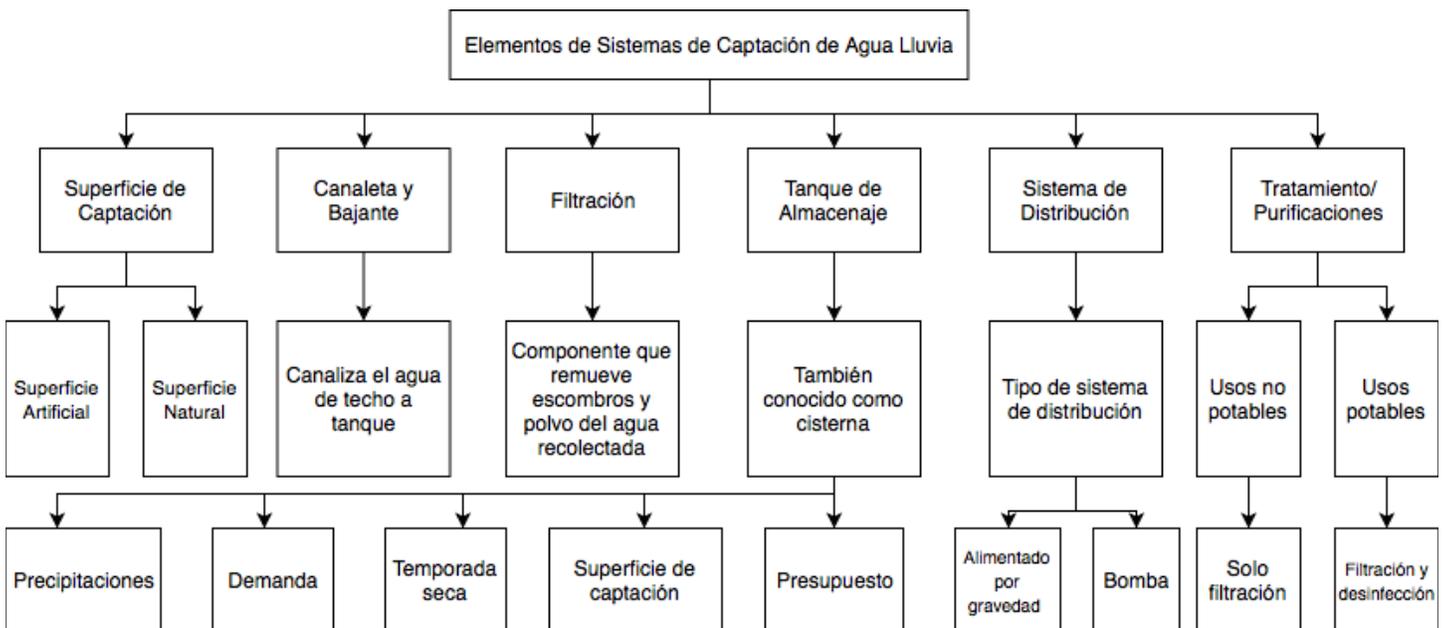


fig. 1.7
Componentes de sistema de captación de agua lluvia.
(Traducción propia de fuente Che-Ani, Shaari & Sairi, 2009)

escorrentía debido a sus propiedades porosas. Finalmente las cubiertas verdes y gravilla, que son las que presentan la mayor concentración de contaminantes, además de tener un muy bajo coeficiente de escorrentía, por lo que no se recomiendan para sistemas de captación de agua lluvia.

Por otra parte, para el trayecto de la recolección del agua en la cubierta, es importante la instalación de mallas que eviten el ingreso de insectos y animales, además de hojas y otros elementos del ambiente que pudieran afectar la calidad del agua.

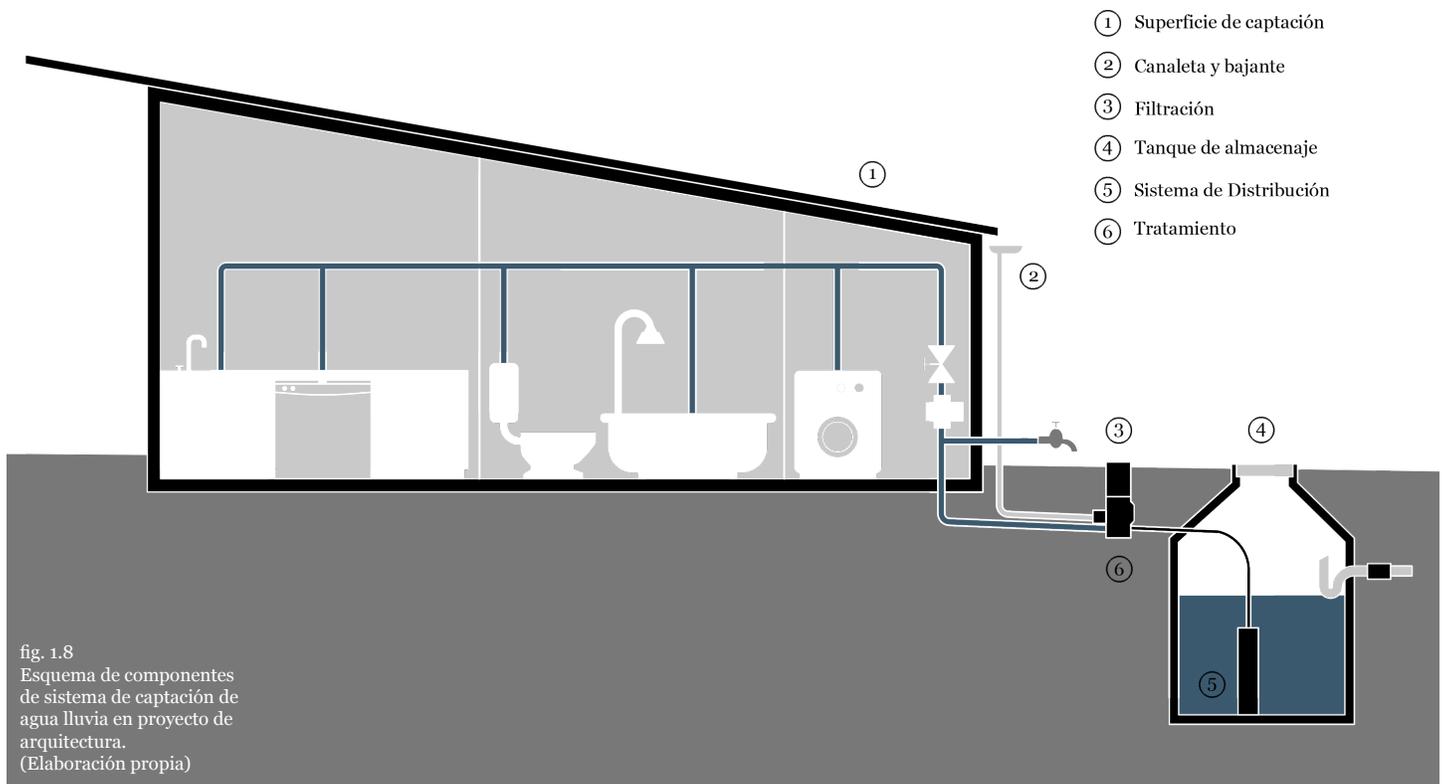
Se recomienda la instalación de un interceptor, dispositivo que recoge el primer lavado de las lluvias (primeros milímetros de lluvia acumulada), teniendo una acumulación separada de mayor pureza. A pesar de que la mayoría de los barriles de almacenamiento de agua lluvia vienen con sistemas de separación del primer lavado, se pueden encontrar otros dispositivos de bajo costo para instalaciones de sistemas de limitado presupuesto. Sin embargo en zonas de bajas precipitaciones, es común que no se separe el primer lavado para minimizar las pérdidas de agua. En ese caso las aguas no podrían ser usadas como agua potable (Thomas, 1998).

Además es recomendable instalar un filtro adicional con el fin de reducir los contaminantes en el agua. A pesar de que filtros que aseguren la potabilidad del agua pueden ser una elevada inversión, se han realizado investigaciones en busca de alternativas de bajo costo para filtros

desinfectantes de agua lluvia recolectada. Algunos ejemplos de éstos son un filtro en base a arena cubierta con hidróxido de hierro (Ahammed & Meera, 2006) y un desinfectante en base a energía solar (Amin & Han, 2009).

En cuanto al almacenamiento del agua, los resultados expuestos por la investigación de Wilbers et al., (2013) sugieren que no hay gran diferencia en cantidad de contaminantes en el agua en los distintos materiales más comunes de almacenaje, que en general son barriles de PVC o cisternas galvanizadas que, a pesar de requerir una mayor inversión inicial, requieren un menor mantenimiento. Tampoco influye en la calidad el tiempo que el agua está almacenada. Ridder et al., (1985) recomiendan que el almacenaje de agua no tenga contacto con el exterior y se mantenga en la oscuridad, por lo que se debería evitar el contacto con la luz directa, evitando el uso de materiales transparentes en el almacenaje del agua. A pesar de que tanques subterráneos son en general más baratos que superficiales, poseen desventajas. Requieren bombas costosas, son más propensas a pérdidas dado la dificultad en detectar fugas y tienen mayor probabilidad de producir contaminantes (Thomas, 1998).

Para determinar el volumen que debe poder almacenar el estanque para cada zona se deben considerar tres escenarios (Thomas, 1998):



1.2.2 Usos para el Agua

- *Día lluvioso* opera con almacenaje no mayor que el consumo de un día.
- *Temporada lluviosa* donde el almacenaje es igual al consumo de varios días.
- *Anual* donde el almacenaje es igual a 60 - 300 días de consumo.

Thomas (1998) menciona en su investigación del valor de sistemas de captación de agua lluvia para uso doméstico, que el clima es lo que más influye en la desición del tamaño del estanque de almacenaje. Nombra zonas de climas semi-áridos como ejemplo de regiones que se verían beneficiadas con estanques suministren el agua para todo el año, no porque estas zonas favorezcan la recolección de agua lluvia, sino porque desfavorecen todas las alternativas. Estas áreas no tienen ríos durante la mayoría del año y los acuíferos subterráneos pueden estar demasiado profundos.

Entre los factores que afecta a la calidad del agua, Wilbers et al., (2013) se sorprendieron al encontrar que el agua no se veía afectada por la cercanía que se encontraban las muestras a una autopista principal. Un factor que sí colaboró en aumentar la cantidad de contaminantes encontradas en la muestra fue la cercanía de ésta a un área industrial de la ciudad investigada, por lo que es importante tener la ubicación del SCALL en consideración antes de usar las aguas recolectadas como agua potable sin tener un tratamiento previo.

A pesar que se considera al agua lluvia como agua limpia en la mayoría de los casos, es más, puede ser de mejor calidad que aguas superficiales y subterráneas, su composición y la presencia de enfermedades ha sido tema de discusión en las últimas décadas. Al no tener una fuente que haya estudiado la calidad del agua lluvia en la comuna de Casablanca, se recomienda que, previo a un tratamiento de purificación, sea reservada exclusivamente para usos no potables dentro de la vivienda. De esta forma, se reduce la demanda de agua potable de la red municipal y el agua es utilizada exclusivamente para limpieza y consumo humano. Por lo tanto, estas viviendas tendrían dos fuentes de agua de distinta calidad para usos distintos, acercando a las viviendas a la autosustentabilidad.

En promedio, el mayor uso de agua en las viviendas se concentra en los baños (duchas y recargas de inodoros). El baño puede concentrar entre un 50% hasta 70% de la demanda total de agua de una vivienda (Energy Saving Trust, 2013; Instituto Politécnico Nacional, 2010; Water Research Fund, 2016). Es por esto que el uso que se le da a aguas de menor calidad que potable es a la recarga de inodoros. Los usos no potables que se le puede dar al agua en las viviendas son principalmente la recarga de inodoros,

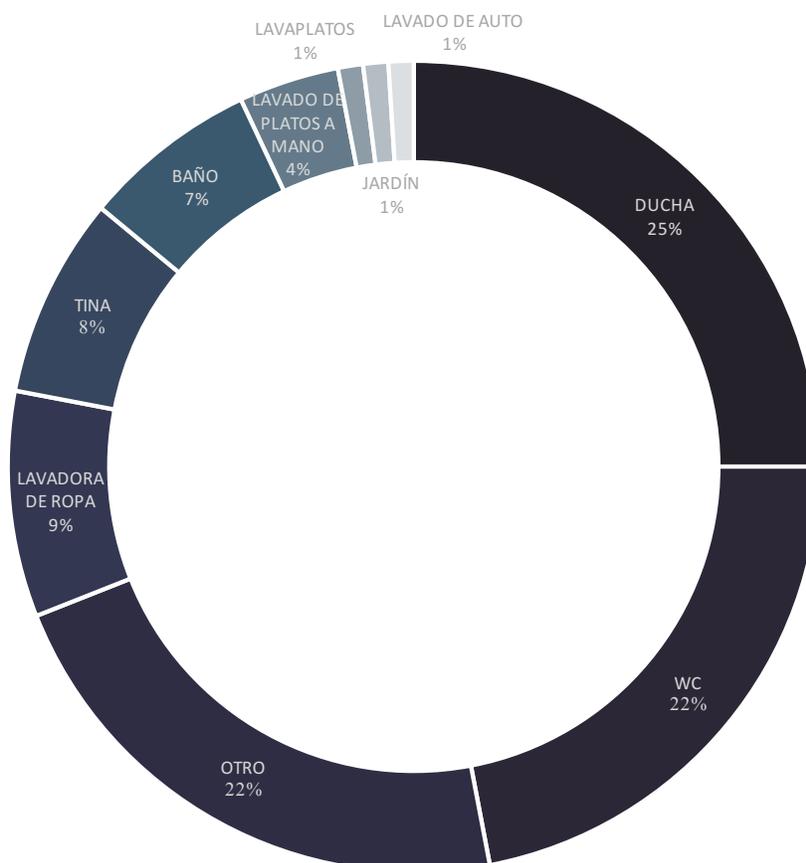


fig. 1.9
División de porcentajes de usos
de agua en viviendas.
(Energy Saving Trust, 2013)

para uso en lavadoras de ropa, lavado de autos e irrigación. Varios grupos en diversos países (Australia, Estados Unidos y México) han registrado los hábitos de consumo de agua dentro de las viviendas, dividiendo en porcentaje cada uso. En general, se estima que la recarga de inodoros representa entre 20% y 30% de la demanda total. El lavado de ropa entre 10% y 20%. Riegos representan desde 1% de la demanda hasta 15% o más dependiendo de tamaños de jardines. El lavado de auto representa 1% hasta 2% de la demanda de agua (EME Group, 2005; Energy Saving Trust, 2013; Instituto Politécnico Nacional, 2010; Melville-Shreeve, Ward & Butler, 2016; Water Research Fund, 2016). Todo esto sumado lleva a concluir que se puede reducir la demanda de agua potable en más de un 60% si se reserva para los usos de consumo e higiene en la vivienda.

En las *fig. 1.9* y *1.10* se grafican las divisiones de porcentajes de usos domésticos de agua por uso y lugar respectivamente, según los resultados del grupo Energy Saving Trust.

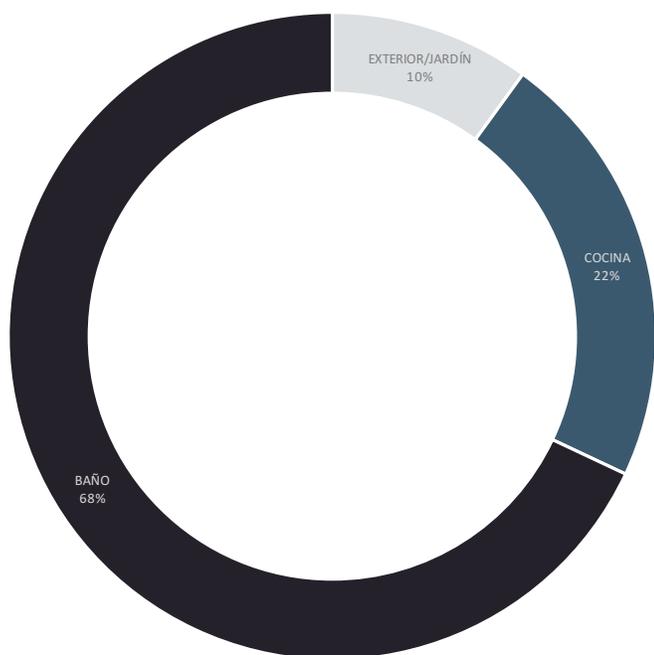


fig. 1.10
División de porcentajes de usos
por lugar en viviendas.
(Energy Saving Trust, 2013)

1.2.3 Reciclaje de Aguas Grises

La captación de agua lluvia aumenta la oferta de agua dentro de la vivienda proporcionando una fuente secundaria de agua desconectada de la red municipal de agua. Sin embargo, para lograr que la vivienda sea eficiente en su uso de agua se pueden integrar otras estrategias secundarias que aseguran que este aumento de oferta hídrica no se desperdicie dentro de la vivienda. Las principales estrategias que generan ahorro de agua en los edificios son los siguientes (Weissenbacher & Möllegger, 2009):

- Captación de agua lluvia.
- Tratamiento de aguas grises dentro de la vivienda.
- Medidas de ahorro de agua: Inodoros de doble descarga, duchas de ahorro de agua.

Se consigue un mejor resultado en la eficiencia hídrica de la vivienda, además de reducir considerablemente costos, si estas estrategias se integran al proceso de diseño individualmente o en combinación (Weissenbacher & Möllegger, 2009).

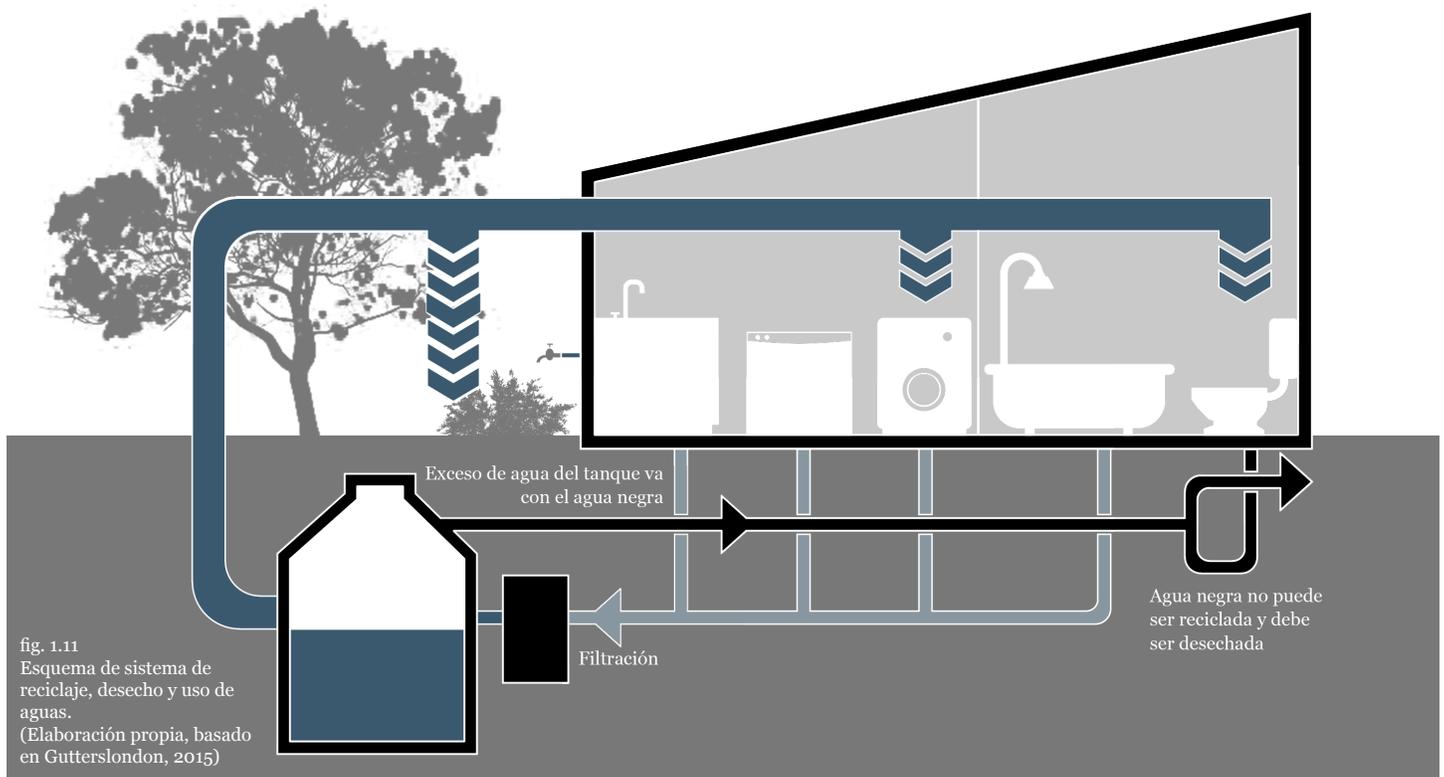
En los últimos 20 años ha aumentado considerablemente el interés de encontrar soluciones que permitan el ahorro de agua en las viviendas e innovaciones en tecnologías han permitido la creación de sistemas que traten las aguas grises producidas por la vivienda para el reuso dentro de la misma (Thomas, 1998). En zonas semi-áridas, viviendas

promedio pueden producir entre 113,000 y 151,000 litros de aguas grises al año (Al-Jayyousi, 2003). El reuso de aguas grises dentro de la vivienda trae beneficio no solo a la vivienda, sino también al sistema de alcantarillado de la ciudad, dado que el volúmen total de aguas residuales disminuye en gran medida, lo que reduce los costos de recolección y tratamiento (Donner et al., 2010; Ghaitidak & Yadav, 2013).

Este aumento de interés en el uso de aguas grises ha llevado a países a empezar a regular el uso de ellas en las viviendas. Uno de los primeros países en regular ésto fue Alemania, donde se introdujeron los parámetros para el uso de aguas grises en viviendas en 1995. Últimamente países como Australia, EE. UU., Japón, Jordania, Chipre e Israel están promoviendo el uso de aguas grises en las viviendas (Fountoulakis, Markakis, Petousi & Manios, 2016). En Chile se establecieron las normas hasta el año 2018, donde se definieron formalmente como:

“Aguas servidas provenientes de las tinas, duchas, lavamanos, lavaplatos, máquinas lavavajillas y lavadoras de ropa. Se excluyen las aguas negras.” (Ministerio de salud de Chile, 2018, p. 2)

El tratamiento de aguas grises consiste en una etapa de sedimentación, tratamiento biológico, una etapa de limpieza y finalmente una desinfección UV (Nolde, 2000).



Nolde (2000) nota también que se puede evitar el uso de desinfectantes químicos en el tratamiento de aguas grises de una rutina normal doméstica debido a que se pueden desinfectar satisfactoriamente con dosis UV de rangos entre 250 y 400 J m². Fountoulakis et al. nombran los humedales construídos y biorreactores de membrana como métodos eficientes de tratamientos de aguas grises en conjuntos urbanos residenciales, especialmente los biorreactores, ya que éstos combinan la separación física de sustancias coloidales, incluyendo bacterias patogénicas, con tratamiento biológico aeróbico de materia orgánica disuelta.

La combinación de las estrategias de recolección de agua lluvia y reciclaje de aguas grises es muy efectiva dado que disminuye el uso de agua potable, reservado para tomar o limpieza, y los usos no potables pueden utilizar agua lluvia y agua reciclada, disminuyendo el agua total utilizada en la vivienda. La combinación de estas dos estrategias puede ser la manera más eficiente de lograr la autonomía de la vivienda de la red de agua potable de la ciudad (Thomas, 1998; Nolde, 2000).

Se recomienda que las aguas grises recicladas sean utilizadas solo para usos no potables dentro de la vivienda, esto se debe a que hasta ahora múltiples investigaciones concluyen que la composición de las aguas grises varían mucho dependiendo de las rutinas de los integrantes de la

vivienda y por lo tanto no siempre se puede garantizar la potabilidad del agua tratada (Fountoulakis et al., 2016). Sin embargo, el agua tratada casi siempre está dentro de los rangos aceptados para uso en relleno de tanques de los inodoros, lavado de autos e irrigación. Es más, los nutrientes y minerales que se encuentran en estas aguas tratadas tienden ser más ventajosos para el riego que agua servida de la red municipal.

Esta investigación resalta la importancia del reuso de aguas grises en las viviendas el día de hoy dado que tienen el potencial de ahorrar un alto porcentaje de agua potable en las viviendas. Fountoulakis et al. (2016) afirman que aguas grises representan un 50% - 70% de las aguas totales consumidas en la vivienda. La investigación dirigida por Revitt, Eriksson & Donner (2011) concluye que con un sistema de tratamiento de aguas grises provenientes de baño, lavandería y cocina, es posible reducir en un 43% el uso total de agua potable, disminuir los litros por persona por día en 51.21 litros debido al uso de aguas grises tratadas para la recarga de inodoros y reducir en 20% los litros de agua devueltos a los alcantarillados de la ciudad. La investigación de Mandal et al. (2011) logra resultados similares. Concluyen que una vivienda que tiene una demanda de 165 lpcd puede ahorrar un 48% de agua potable al tratar y reutilizar sus aguas grises. En la figura 1.11 se ilustra un sistema de reciclaje de aguas grises y los usos domésticos que se le puede dar al agua tratada.

1.2.4 Caso Casa MM, OHLAB

Edificios que se enfocan en ahorrar recursos naturales, asegurando emisiones mínimas como de dióxido de carbono y aguas residuales tienen beneficios tanto económicos como ecológicos, además, beneficios adicionales pueden aparecer: usando el ciclo interno del agua como elemento de diseño visible y mejorando el clima dentro de la vivienda al mismo tiempo (Weissenbacher & Möllegger, 2009).

Aún el día de hoy hay falta de sistemas que permitan que el retrofit de edificios construidos sea económicamente alcanzable para un gran número de personas. Normalmente integrar sistemas de captación de agua lluvia requiere de un presupuesto grande (Melville-Shreeve, Ward & Butler, 2016). Es por esto que conviene que se integre desde la etapa de diseño de una vivienda el recorrido que tendrá el agua y cómo se integra a ella un sistema de captación de agua lluvia.

El caso de la casa MM (*fig. 1.12*) construida por la oficina de arquitectura OHLAB en Palma, España en el 2016 es notable dado que, a pesar que está situada en una zona que tiene bajas precipitaciones anuales (364 mm en promedio al año) (Meteoblue, 2019) logra abastecer el 100% de su demanda de agua con agua de lluvia recolectada, además de alcanzar el estándar Passivhaus de máxima eficiencia energética.

La vivienda y por lo tanto el programa, se divide en cuatro cajas, cocina, estar/comedor, dormitorio principal y habitaciones de invitados. Cada caja tiene su propia cubierta en pendiente de material de losas de baño para mantener una superficie de alto coeficiente de escorrentía.

“Las cubiertas inclinadas cuentan con un sistema de recogida de las aguas pluviales, tres de las cubiertas recuperan para riego mientras que la cuarta cubierta es “limpia” y recupera para consumo. Para ello se habilitan dos aljibes independientes, uno de 40 m³ y otro de 8 m³, que se disponen aprovechando los huecos creados entre la vivienda y el terreno inclinado.” (*fig. 1.13*) (OHLab, 2016, párr. 3)

La inclusión del sistema de captación de agua lluvia en el diseño del proyecto y la utilización del terreno para permitir escurrimientos gravitacionales en vez de la utilización de bombas, permite que este proyecto sea de bajo costo a pesar de que tenga estándares de eficiencia altos y que el 100% de su agua sea recogida *in situ*. “En el primer invierno habitado de la vivienda, el consumo energético de calefacción fue CERO y el gasto económico de agua fue CERO (100% agua lluvia).” (Archdaily, 2016)



fig. 1.12 a, b & c
Casa MM.
(OHLab, 2016)

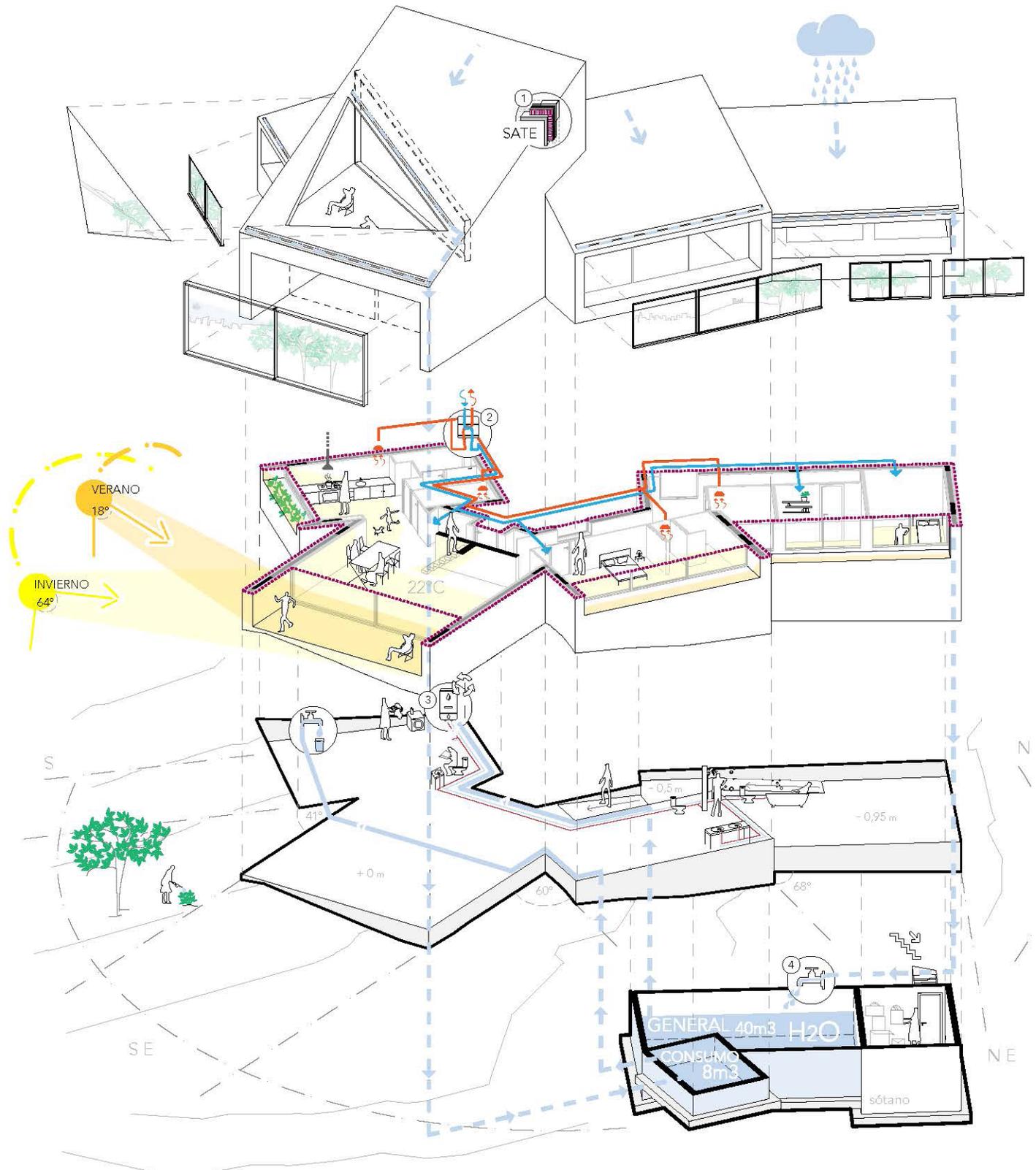


fig. 1.13
 Esquema estrategias casa MM.
 Acumulación y uso de aguas.
 (OHLab, 2016)

2. CASABLANCA SEGÚN PLAN REGULADOR Y VIVIENDA

2.1 Casablanca

La comuna de Casablanca se ubica dentro de la región de Valparaíso al sureste de la provincia de Valparaíso. Su ubicación le da a la ciudad de Casablanca un carácter de articulación central entre las ciudades de Santiago, Valparaíso, San Antonio y Algarrobo. La cercanía a la Ruta 68 la conectan con los transeúntes de Valparaíso y Santiago y su cercanía a la Ruta F-90 la conecta con los que viajan hacia Algarrobo (fig. 2.1). Gracias a este factor de conexión con las áreas más urbanas del país, Casablanca tiene la oportunidad de desarrollar el turismo y las producciones silvoagropecuarias (Municipalidad de Casablanca, 2019).

El día de hoy la ciudad está en proceso de actualizar su plan regulador que no ha sido revisado desde 1990, con el fin de tener un desarrollo urbano controlado durante los próximos 30 años en la región, además de tener otros objetivos con enfoque en la sustentabilidad y la conservación del ambiente. En la fig. 2.2, se muestra un esquema de la zonificación que se busca para las distintas áreas de la ciudad.

Algunos de los objetivos principales de esta actualización son (Municipalidad de Casablanca, 2019):

- Desarrollar la producción económica de la zona, promoviendo la competitividad de Casablanca dentro de las comunas de la región.
- Mantener la escala de los poblados y rescatar la imagen patrimonial que tiene cada una fomentando la renovación.
- Proponer que la vialidad estructurante de los centros poblados sea jerarquizada de acuerdo a su uso local para transporte de carga.

Mientras que dentro de los objetivos ambientales están (Municipalidad de Casablanca, 2019):

- Disminuir los problemas ambientales de contaminación.
- Dotar de nuevas áreas verdes.
- Resguardar las condiciones paisajísticas.

En el desarrollo de la actualización del plan regulador se realiza una proyección para la población de Casablanca para el año 2035. Esta proyección se realiza tomando como punto de partida el crecimiento de población entre los años 2002 y 2020. En el censo del 2002 Casablanca presentó una población de 21,874 y en el 2017 una población de 26,867; un aumento de aproximadamente 23% (significativo, comparado con la variación de la población total de la región del 18%) (BCN, 2017). Siguiendo esta línea, la municipalidad proyecta alcanzar una población de 38,465 habitantes en Casablanca para el año 2035.

En cuanto a las actividades productivas de la comuna, se destacan dos primarias:

- El sector de agricultura, ganadería, caza y silvicultura, que concentra un 16% del total de empresas registradas en la común.
- El sector de transportes y almacenamiento que concentra el 22% del total de empresas.

fig. 2.1
Localización y carácter de nodo de la ciudad de Casablanca.
(Municipalidad de Casablanca, 2019)

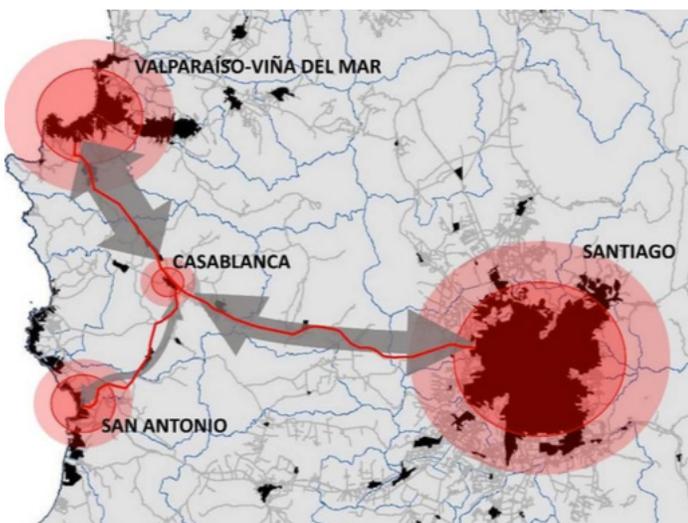
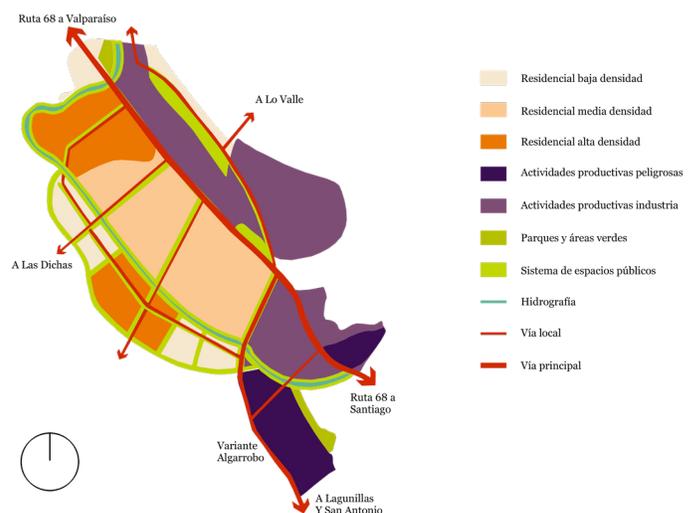


fig. 2.2
Esquema de actualización al plan regulador de Casablanca.
(Municipalidad de Casablanca, 2019)



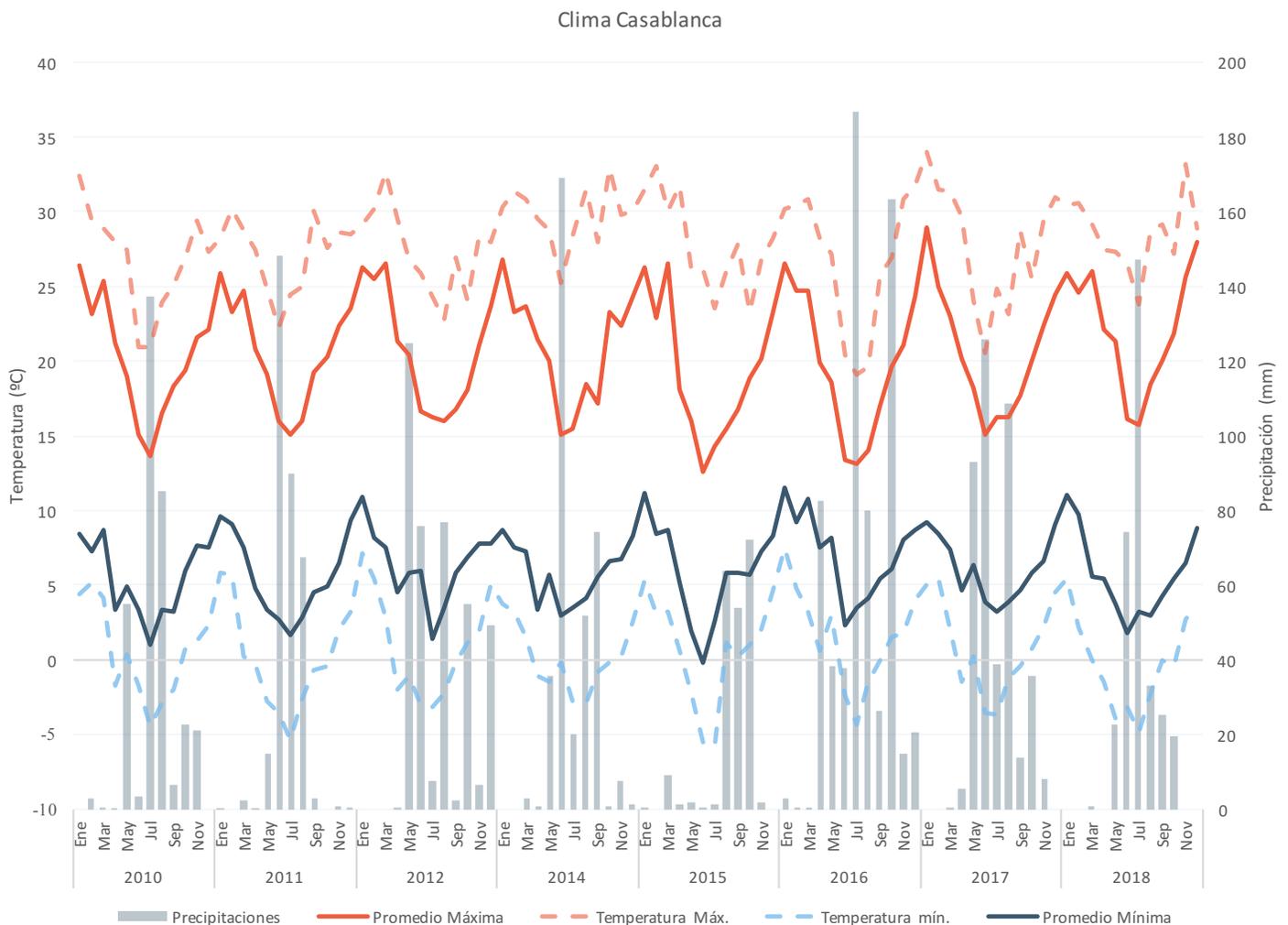
2.2 Clima

El clima de la comuna de Casablanca es de clima templado de tipo mediterráneo costero. Tiene una variación alta de temperaturas en un solo día, con noches y mañanas frías y tardes de calor, y una humedad relativa alta durante el año. Aunque el clima es relativamente seco, las precipitaciones son altas cuando se compara con las del resto de la región debido a su cercanía a la costa y su ubicación sur dentro de la misma, alejado de las zonas más áridas.

A partir de reportes históricos publicados por la estación meteorológica de Casablanca, ubicada a 2 km al oeste de la ciudad, desde el año 2010 se elaboró una recopilación de todos los datos cada hora, desde el primero de enero del 2010 hasta el 31 de diciembre del 2018 (con la excepción del año 2013, en donde hay un periodo de tres meses donde no se registraron datos debido a fallas técnicas). Mediante esta recopilación se puede promediar la información para tener un estimado del clima en Casablanca en la última década (Agromet, 2019).

En la *fig. 2.3* se puede observar que coincide el clima con las registradas por la BCN, con veranos de temperaturas entre 10 y 25 grados e inviernos entre 3 y 15 grados. Se

fig. 2.3
Temperaturas y precipitaciones en Casablanca entre 2010 y 2018. (Elaboración propia en base a reportes históricos Agromet, 2019)



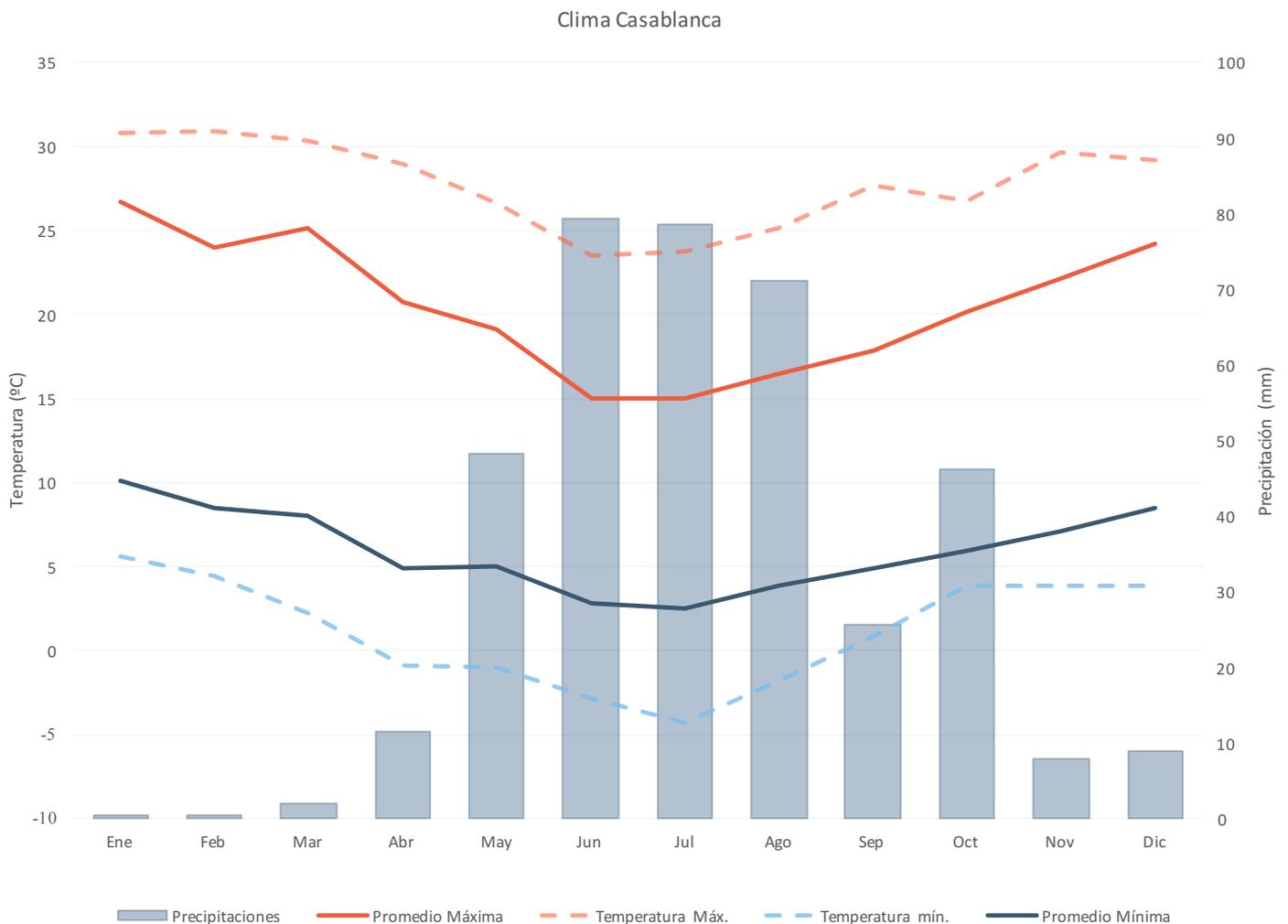
puede observar también que en los 10 años estudiados, el promedio de temperatura ha tenido un aumento leve pero constante. Las precipitaciones son invernales y tienen un promedio de 380 mm anuales.

En la *fig. 2.4* se promedian los datos de todos los años para encontrar una aproximación al clima en las estaciones de un año. Se observa con mayor claridad que las lluvias principales ocurren entre abril y octubre, donde la mayor parte de éstas se concentra entre junio y julio.

También es clara la gran variedad que tienen las temperaturas durante no sólo el año, sino también durante un solo día. Aunque en promedio las temperaturas de verano e invierno varían en 15 grados entre la mañana y tarde de un día, en casos extremos esta variación puede ser de hasta 25 grados, pasando de 6 grados a 32 en verano y de -4 grados a 23 en invierno, por lo que una vivienda en la ciudad de Casablanca debe considerar esta característica del clima en su diseño para poder proveer una temperatura de confort en todas estas situaciones.

Sobre el clima de la región cabe destacar que ha habido una desertificación en la zona en las últimas décadas. El aumento de la demanda de agua por la agricultura y agotamiento de la oferta ha contribuido al despoblamiento vegetal de las laderas de cerros y quebradas, que acelera el escurrimiento y reduce la recarga de napas. Todo esto ha intensificado la aridez de la zona y se ha detectado desde el siglo XX que el desierto de Atacama se ha ido expandiendo hacia el sur a razón de 0.4 a 1 km por año. Es probable que esto continúe hasta que naturalmente se llegue a un balance (Santibañez, 2016).

fig. 2.4
Promedios de temperaturas y precipitaciones en Casablanca entre 2010 y 2018.
(Elaboración propia en base a reportes históricos Agromet, 2019)



2.3 Vivienda

La ciudad de Casablanca se caracteriza por tener un perfil de edificios bajos en todas las áreas de la ciudad, desde el centro colonial, hasta las viviendas más nuevas que se han construido. Los edificios generalmente no superan los 2 pisos. Esto es especialmente cierto en las áreas residenciales, donde las viviendas en su mayoría son menores a 140 metros cuadrados y de poca altura (fig. 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9).

Esto, sin embargo, está comenzando a cambiar dado que Casablanca ha tenido un aumento en su población del 22% en los últimos 17 años, por lo que la densidad de sus ciudades está en una etapa de crecimiento rápido (Municipalidad de Casablanca, 2019). Esto ha promovido la construcción de edificios de departamentos de alta densidad en algunas áreas de la ciudad, en busca de alojar a los nuevos residentes.

La actualización del plan regulador de 1990 busca entre otras cosas evitar la densificación de áreas de la ciudad para mantener la imagen histórica de Casablanca y consolidar algunas zonas

residenciales de densidad alta en las periferias en crecimiento de la ciudad. Dentro de los objetivos para la imagen de la ciudad de Casablanca del plan regulador se puede identificar promover una nueva zona de crecimiento residencial al sur de la ciudad, armoniosa con el entorno, que cuente con zonas previstas para desarrollo de equipamiento y áreas verdes.

Al analizar los permisos de edificación concedidos para la ciudad de Casablanca en los últimos tres años, se puede ver una tendencia a las viviendas de baja densidad (unifamiliares) que se mantienen por debajo de los 140 m² de construcción para ser categorizadas viviendas DFL-2.

A pesar que el plan regulador menciona la sustentabilidad como uno de los factores más importantes a promover en el desarrollo de la ciudad, habla solamente de la creación de espacios verdes. Se debe aprovechar el interés por la sustentabilidad para expandir los

objetivos que deben lograr los nuevos conjuntos de vivienda en la ciudad:

- Mantener la imagen actual de la ciudad de un perfil de baja densidad.
- Asegurar la reducción en la demanda de agua de las viviendas.
- Mitigar las consecuencias de los cambios climáticos que se esperan para los próximos años en la ciudad (inundaciones y desertificación de la zona).

fig. 2.5 y fig. 2.6
Casas típicas de Casablanca.
(Fotografías propias, 2019)



fig. 2.7 y fig. 2.8
Casas típicas de Casablanca.
(Fotografías propias, 2019)



fig. 2.9
Perfil de calle residencial en
Casablanca.
(Fotografía propia, 2019)



2.4 El Agua en Casablanca

La comuna de Casablanca se caracteriza por su producción vegetal. Uno de sus mayores atractivos turísticos es la ruta del vino, donde se encuentran los distintos viñedos de la comuna, además de otros múltiples productos frutales y vegetales que se producen en la zona. Cada uno de estos proyectos tiene un alto requerimiento de agua y la comuna, estando en una etapa de expansión constante, sigue aumentando el número de sembradíos cada año, aumentando la demanda de agua total de la misma.

Actualmente, la totalidad del agua potable utilizada en la comuna son aguas superficiales o de extracciones subterráneas. La compañía ESVAL abastece a la población (en localidades que tienen contrato con la empresa) de agua potable extraída a lo largo de la región. Sin embargo, la mayor restricción a la que se enfrenta el crecimiento de la población de la comuna de Casablanca son las localidades con deficientes instalaciones sanitarias o inexistencia de ellas, lo que limita su acceso a agua potable y por lo tanto no pueden exceder un cierto número de su población sin arriesgar a que residentes no tengan acceso a agua potable. Este límite es dado por la baja población en localidades urbanas que, a pesar de estar en crecimiento, la población aun no es la suficiente para justificar la inversión de las instalaciones sanitarias. Esto es especialmente cierto en las áreas rurales con aún menor población ya que la distancia entre casas es mayor y la inversión para las instalaciones tendría que ser aún mayor para una menor cantidad de personas.

Uno de los mayores problemas a los que se ha enfrentado la oferta de agua en la región de Valparaíso son las extracciones de agua subterráneas informales, normalmente para usos de irrigación en plantaciones rurales (Budds, 2009; 2018; Santibañez, 2016), ya que éstas no son consideradas para calcular el total de demanda de la región y se tiene una percepción errónea de la oferta y demanda hídrica real.

Es por esto que los sistemas de captación de agua lluvia se presentan como una opción valiosa de proveer a viviendas con una fuente secundaria de agua de manera independiente, con la intención de disminuir las extracciones de agua y la demanda existente a las redes sanitarias municipales, promoviendo la recarga de las napas. Esta alternativa podría ser de interés para la población dado el alto costo de inversión de las extracciones de agua subterráneas e instalación de redes de infraestructura subsecuente y el beneficio agregado al ecosistema reduciendo la demanda y extracción de agua reduciendo los efectos que están provocando la desertificación en la región y el ahorro económico para la comuna.

Según la información levantada por ESVAL (*tab. 2.1*) en la ciudad de Casablanca para el plan de desarrollo vigente, se abastece en el año 2019 a un total de población de 18,461 con un número de 6,424 clientes que reciben sus servicios. Registra un índice de habitabilidad promedio de 3.01 habitantes por vivienda y el promedio de consumo de clientes es de 186.3 litros por habitante por día (16.3 m³ por cliente por mes). Esto representaría en el total del año una demanda de 104,711 m³ de agua potable para las viviendas de Casablanca. Se espera que para el año 2030, la población sea de 21,348 y 8,067 clientes, lo que representaría una demanda de consumo de 131,492 m³, por lo que se espera que la demanda aumente un 25.58% entre 2019 y 2030.

Una posibilidad de abastecimiento que no se toma en cuenta en la quinta región es el potencial de abastecimiento que puede proveer la recolección de agua lluvia en la escala de la vivienda para uso doméstico.

La región ha estado pasando por etapas de grandes sequías, por lo que esta práctica es pasada por alto por los residentes, dado el volumen reducido de precipitaciones que ocurre cada año en la comuna. Sin embargo, esta investigación busca hacer el argumento de que hay un valor existente para la vivienda en la disminución importante de la demanda diaria de agua potable extraída por ESVAL si se utilizan agua lluvia captadas dentro de las viviendas para uso doméstico.

Como se puede extraer de gráficos elaborados en puntos anteriores, en promedio caen 380mm de lluvia al año en Casablanca, pero ésta puede llegar a extremos de 654mm en el máximo y 206mm en el mínimo. Esta cantidad de precipitaciones son correspondientes a las de un clima semi-árido.

Vale notar también, que el promedio de demanda de agua potable en viviendas de Casablanca es considerablemente mayor al mínimo de agua sugerido por la Organización Mundial de la Salud [OMS] de 100 litros por persona al día (OMS, 2003; 2013) (*fig. 2.10*), por lo que existe la posibilidad de reducir el promedio de demanda en el futuro, incorporando métodos de ahorro de agua potable.

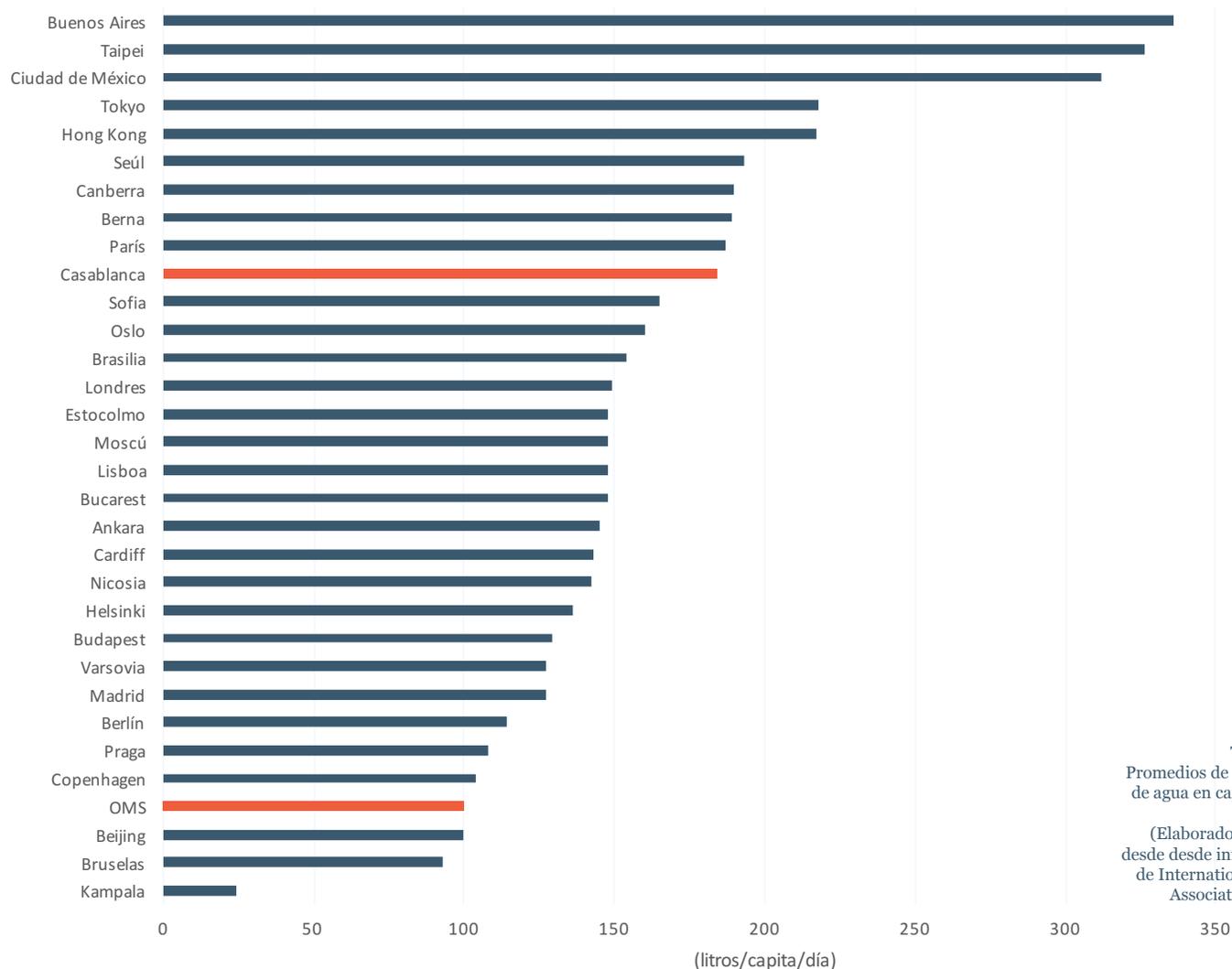


Tabla 2.10
Promedios de consumos
de agua en capitales del
mundo.
(Elaborado por autor
desde desde información
de International Water
Association, 2016)

Tabla 2.1 - Proyección de Demanda de Agua Potable dentro del Territorio Operacional							
Localidad: Casablanca							
Año	Población	Cobertura	Población	Índice	Clientes	Dotaciones de Consumo	
	Total en T.O.	AP	Abast	Habit.		Población	Clientes
	Hab.	%	Hab.	Hab/viv	Nº	l/hab/día	m3/cl/mes
2015	17,320	99.6%	17,245	3.10	5,827	177.2	15.9
2016	17,616	99.7%	17,559	3.08	5,977	179.4	16.0
2017	17,905	99.8%	17,866	3.06	6,126	181.6	16.1
2018	18,186	99.9%	18,167	3.04	6,275	183.9	16.2
2019	18,461	100.0%	18,461	3.01	6,424	186.3	16.3
2020	18,749	100.0%	18,749	2.99	6,574	187.7	16.3
2021	19,032	100.0%	19,032	2.97	6,723	189.1	16.3
2022	19,310	100.0%	19,310	2.95	6,872	190.5	16.3
2023	19,582	100.0%	19,582	2.92	7,022	191.9	16.3
2024	19,849	100.0%	19,849	2.90	7,171	193.3	16.3
2025	20,111	100.0%	20,111	2.88	7,320	194.7	16.3
2026	20,368	100.0%	20,368	2.86	7,470	196.2	16.3
2027	20,621	100.0%	20,621	2.84	7,619	197.6	16.3
2028	20,868	100.0%	20,868	2.82	7,768	199.1	16.3
2029	21,110	100.0%	21,110	2.80	7,918	200.6	16.3
2030	21,348	100.0%	21,348	2.78	8,067	202.1	16.3

Tabla 2.1
Proyecciones de
demanda de agua para el
año 2030.
(ESVAL, 2019.)

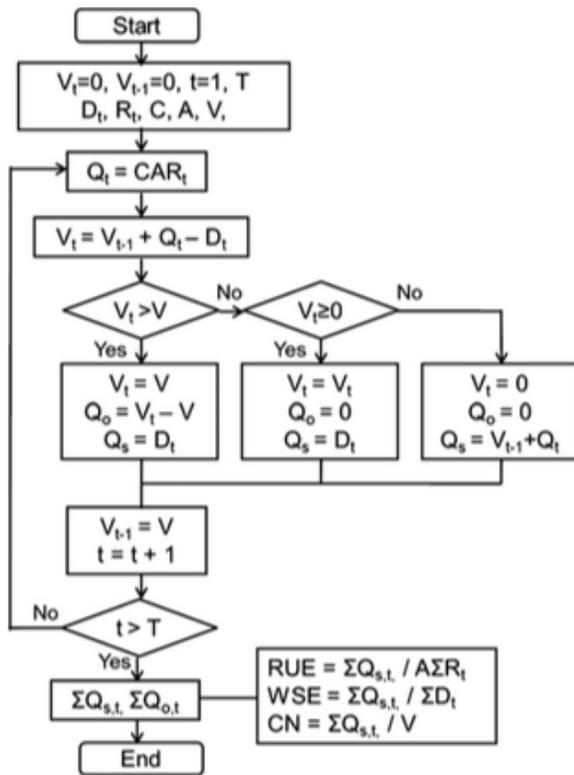
3. LA CUBIERTA EN CASABLANCA

3.1 Parámetros y Diseño

En este capítulo se analiza el caso de Casablanca y el impacto que tendría sobre su demanda de agua potable la instalación de sistemas de captación de agua lluvia en las cubiertas de las viviendas de futuros proyectos a partir del método sugerido por Mun & Han (2012).

Este método consiste en la utilización de un diagrama de flujo para determinar los parámetros de operación del sistema de acumulación de agua lluvia. El diagrama toma los variables de los sistemas (área de captación, volumen de estanque, demanda de agua y precipitación) y ayuda a determinar medidas óptimas que deban tener las variables que son parte del diseño.

El diagrama es el siguiente (Mun & Han, 2012):



Donde:

- Dt: Demanda diaria promedio de agua lluvia (m³/día).
- Rt: Lluvia diaria (mm/día).
- C: Coeficiente de escorrentía.
- A: Área de cubierta (m²).
- V: Volúmen del tanque (m³).
- t: Tiempo transcurrido (días).
- T: Periodo de simulación.
- Qt: Afluencia (m³/día).
- Qo: Desbordamiento (m³/día).
- Qs: Supply (m³/día).
- RUE: Rainwater Use Efficiency (Eficiencia del uso de agua lluvia) (%).
- WSE: Water Saving Efficiency (Eficiencia de ahorro de agua) (%)
- CN: Número de ciclos (veces).
- ΣQ_{s,t}: Uso total de agua lluvia.
- ΣQ_{o,t}: Total de desbordamiento.

Este diagrama de flujos puede señalar cuáles serían los tamaños más convenientes para la superficie de captación (A) y el volumen del tanque (V) para un sistema de captación de agua lluvia en Casablanca. Mun & Han (2012) concluyen también que se deben mantener proporciones entre los elementos para alcanzar una eficiencia en el sistema. Debe mantenerse una proporción entre el área de captación y el volumen del tanque ya que si el tanque no puede acumular la mayoría de las aguas recogidas por la superficie, el sistema pierde efectividad. También se debe mantener una proporción entre la demanda de agua y el área de captación, ya que si la demanda es muy alta, el tanque de agua se vaciará más rápido de lo que se puede llenar.

Para los cálculos, se puede obtener el dato de la demanda de agua potable de las viviendas de la ciudad de Casablanca de dos maneras. La primera, con información de ESVAL que tiene registrados los metros cúbicos consumidos en promedio por todos los clientes que cuentan con sus servicios. En el año 2019 son 6,424 clientes (aproximadamente 3 habitantes por vivienda y se espera que el número de personas por vivienda se reduzca a 2.78 para el 2030) que cuentan con 16.3 metros cúbicos de agua, o 16,300 litros de agua al mes. Eso equivaldría a 535.9 litros de agua por cliente al día o, si se toma que cada cliente representa a tres personas en una vivienda, 178.6 litros de agua por persona al día.

La segunda forma, se puede calcular la demanda de agua de un cierto conjunto de viviendas con el mínimo de agua que cubra todas las necesidades básicas de una vivienda sugerido por la OMS (2003; 2013) que es entre 70 y 100 litros de agua por persona al día, tomando en cuenta todas las actividades para las que las personas utilizan agua: consumo humano, cocinar, lavado personal y ropa, limpieza de la vivienda, regado de plantas e instalaciones sanitarias.

A partir del análisis de los reportes históricos de la estación Casablanca (Agromet, 2019), se puede obtener el dato de las precipitaciones. El promedio de precipitaciones anuales en los últimos diez años es de 380 mm. UNESCO (2015) y Farreny et al. (2011) concluyen que el coeficiente de escorrentía en una cubierta con pendiente es de 0.9, sin embargo, ésta puede llegar a ser 0.95 en cubiertas de metal y de plástico. Considerando el caso desfavorable de una cubierta promedio se utiliza el coeficiente de escorrentía 0.9.

Con estos datos, podemos saber los litros de agua lluvia que se pueden captar en Casablanca en eventos de lluvia entre el año 2010 y 2018.

Para la elaboración del diagrama de flujos de Casablanca se toma un periodo T de 4 años (1461 días) entre 2015 y 2018.

3.2 Desempeño Vivienda con Sistema de Recolección

Casablanca es una ciudad de clima semi-árido que se caracteriza por tener lluvias invernales y un periodo seco muy largo entre noviembre y abril. Aunque tiene un promedio de precipitaciones de aproximadamente 380 mm, casi toda esta lluvia se concentra entre los meses de mayo y agosto. Esto significa que para la acumulación de agua lluvia en Casablanca, una vivienda tiene que ser capaz de acumular mucha lluvia en los meses de invierno para poder guardarla y utilizarla en verano cuando es el periodo seco. Esto contrasta con países tropicales, que tienen periodos secos de máximo una semana, donde se puede abastecer una

vivienda durante todo el año con agua con un estanque de poca capacidad ya que esta se llenaría casi todos los días.

Para esta simulación, se elige analizar dos casos: una con la demanda actual de las viviendas de Casablanca (535 litros por vivienda por día, o 178 litros por persona al día, considerando tres personas por vivienda) y por el mínimo de agua sugerido por la OMS (2003; 2013) de 100 lppd, o 300 litros por vivienda al día. En ambos casos se calcula cubrir el total de la demanda de agua (fig. 3.5 y 3.6), y separando la captación de agua en un 30 y 70 por ciento (fig. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4). Además, cada caso se calcula para una

superficie de captación de 50 m², 100 m², 150 m² y 200 m² y para tanques de agua de 5,000, 10,000, 20,000 y 40,000 litros de agua de volumen.

El primer descubrimiento que se hizo fue que a mayor la demanda, mayor será la RUE. Esto se debe al hecho que el incremento en la demanda ayuda a vaciar más rápido el tanque y disminuye las pérdidas por desbordamiento. Esto significa que para alcanzar el mismo nivel de eficiencia de una demanda mayor, se debe aumentar el volumen del tanque de recolección (fig. 3.1 y 3.3). Esta proporción también lleva a la conclusión que una vez que se alcanza

fig 3.1 a y b
Variación en eficiencia de uso de agua lluvia (RUE) para usos exclusivamente no potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd. (Elaboración propia desde método Mun & Han, 2012).

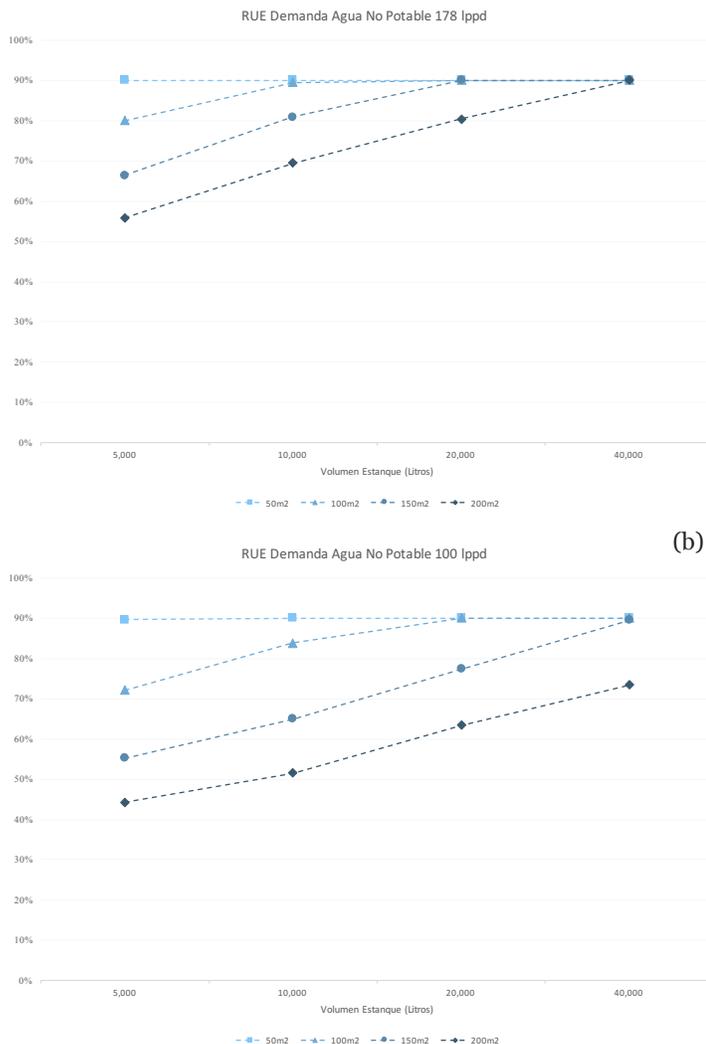
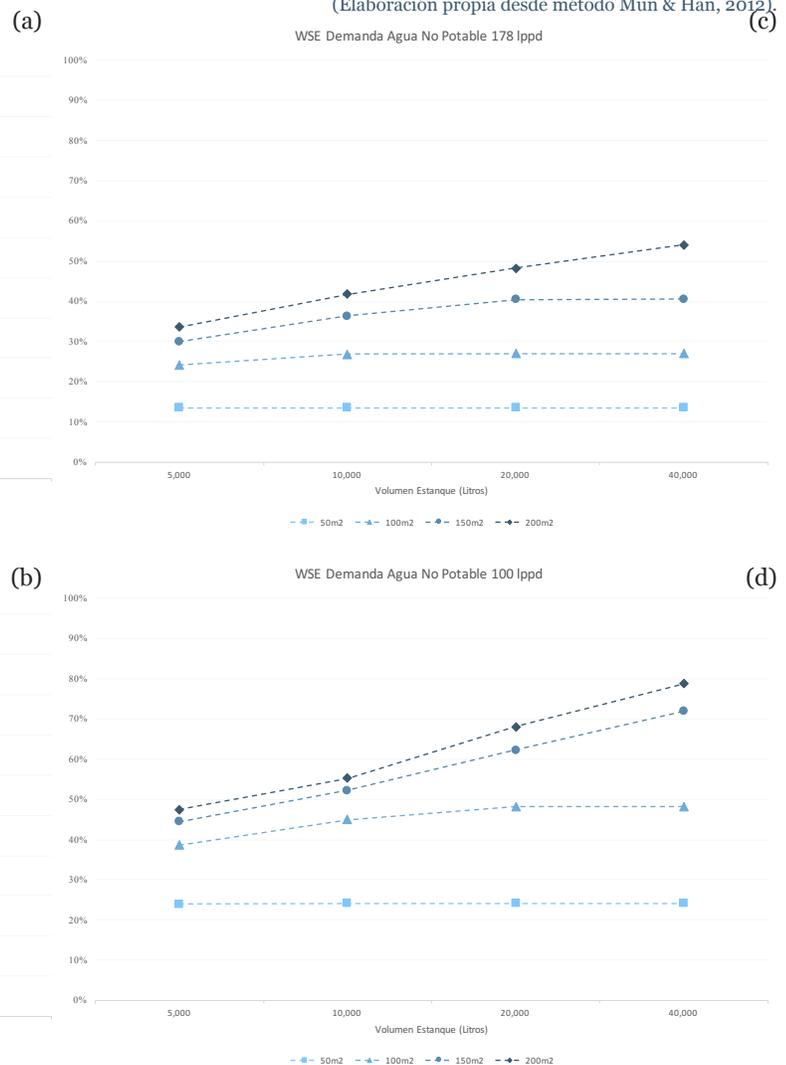


fig 3.2 c y d
Variación en eficiencia de ahorro de agua (WSE) para usos exclusivamente no potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd. (Elaboración propia desde método Mun & Han, 2012).



un RUE de 90% (no se alcanza 100% debido a las pérdidas por el coeficiente de escorrentía de la superficie de captación) no es necesario un mayor volumen de tanque para esa A.

A partir de esto, con los resultados obtenidos de WSE de los casos estudiados (fig. 3.2), se puede observar que desde un inicio, una vivienda de Casablanca con la demanda del día de hoy, con una cubierta de 100 m² y un estanque de apenas 5 m³, se es capaz de cubrir aproximadamente 25% de los usos no potables del agua con agua lluvia, que significaría una reducción de 18% del total de agua potable en esa vivienda.

En una vivienda de 200 m² de cubierta donde se consume 100 lppd el agua lluvia pueden abarcar aproximadamente 80% de los usos no potables de la vivienda con agua lluvia, reduciendo en más de la mitad la demanda de agua potable de la vivienda.

Esta investigación también concluye que es necesario no solo encontrar una fuente secundaria de agua para reducir la dependencia de las viviendas a la red de agua de la ciudad, sino también es necesario reducir la demanda de agua actual. Si se logra esto, los sistemas de captación de agua lluvia se vuelven

mucho más eficientes. Como se señala previamente en el capítulo 1.2.3, las estrategias que se sugieren utilizar para el ahorro del agua en la vivienda son en primer lugar un sistema de captación de agua lluvia, que aumenta la oferta de agua disponible, después un sistema de reciclaje de aguas grises, que aumenta la durabilidad de uso que tendría esa mayor oferta de agua y finalmente que las instalaciones sanitarias de la vivienda fueran eficientes en su uso de agua. Solamente esta última estrategia conseguiría para las viviendas una demanda reducida más cercana a la sugerida por la OMS de 100 litros por persona al día.

fig 3.3 a y b
Variación en eficiencia de uso de agua lluvia (RUE) para usos exclusivamente potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 300 lpcd. (Elaboración propia desde método Mun & Han, 2012).

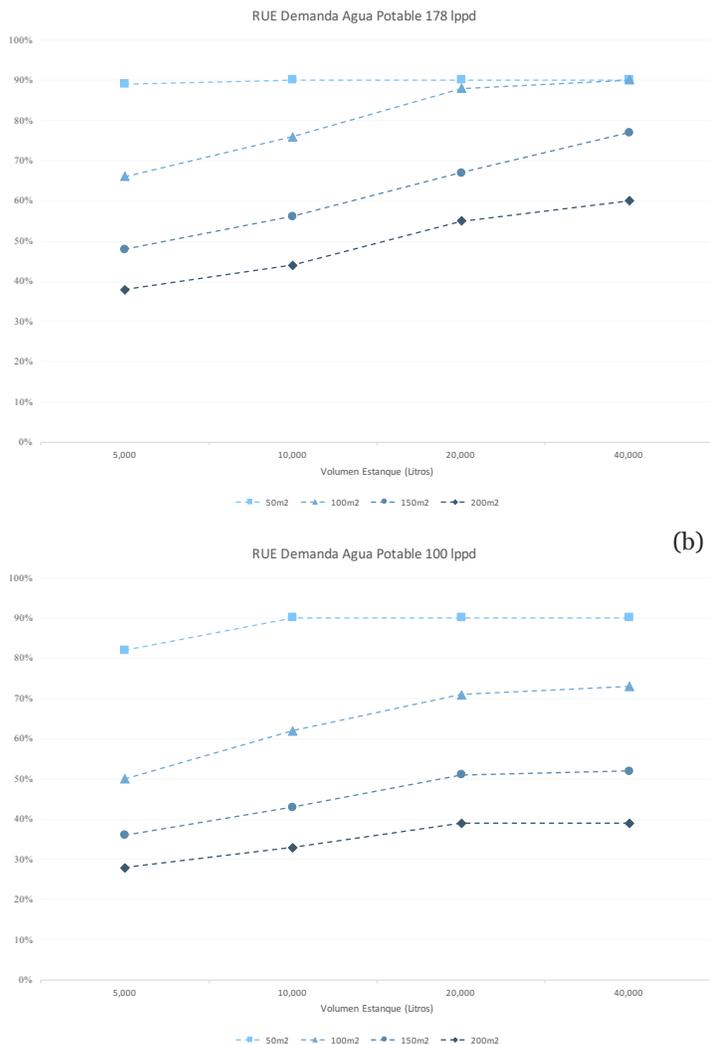


fig 3.4 c y d
Variación en eficiencia de ahorro de agua (WSE) para usos exclusivamente potables con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 300 lpcd. (Elaboración propia desde método Mun & Han, 2012).

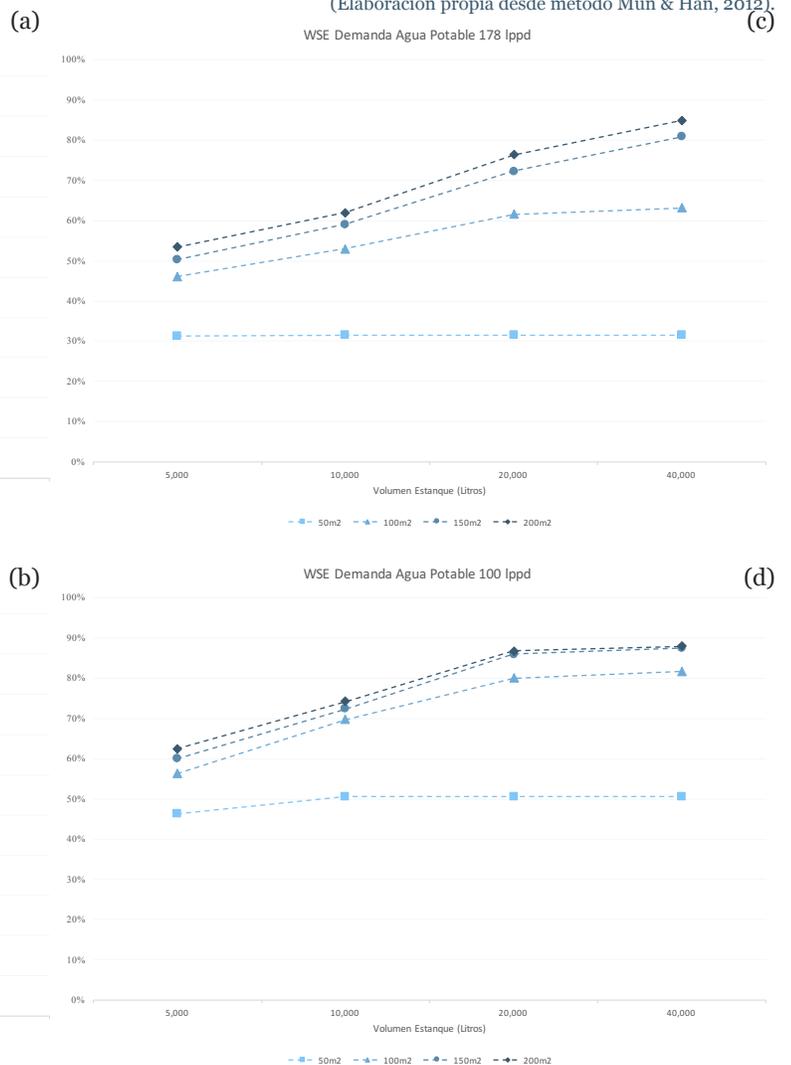
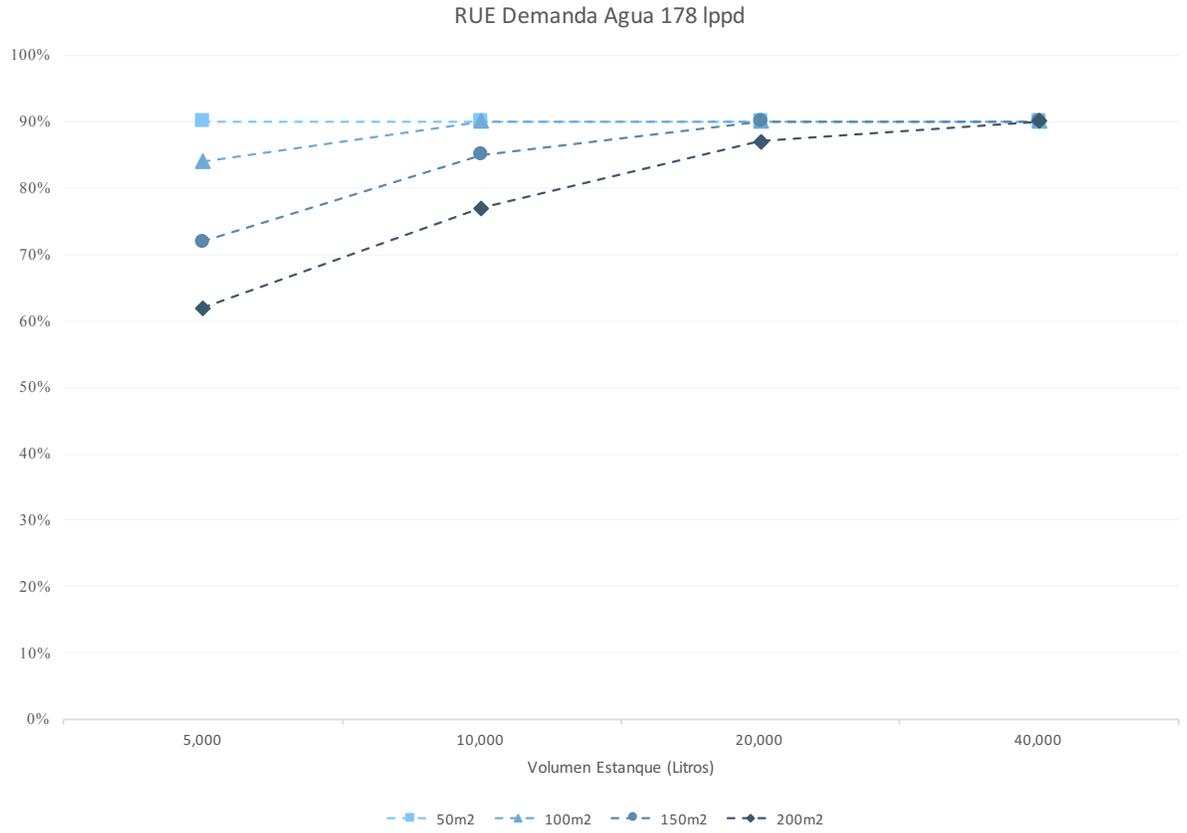
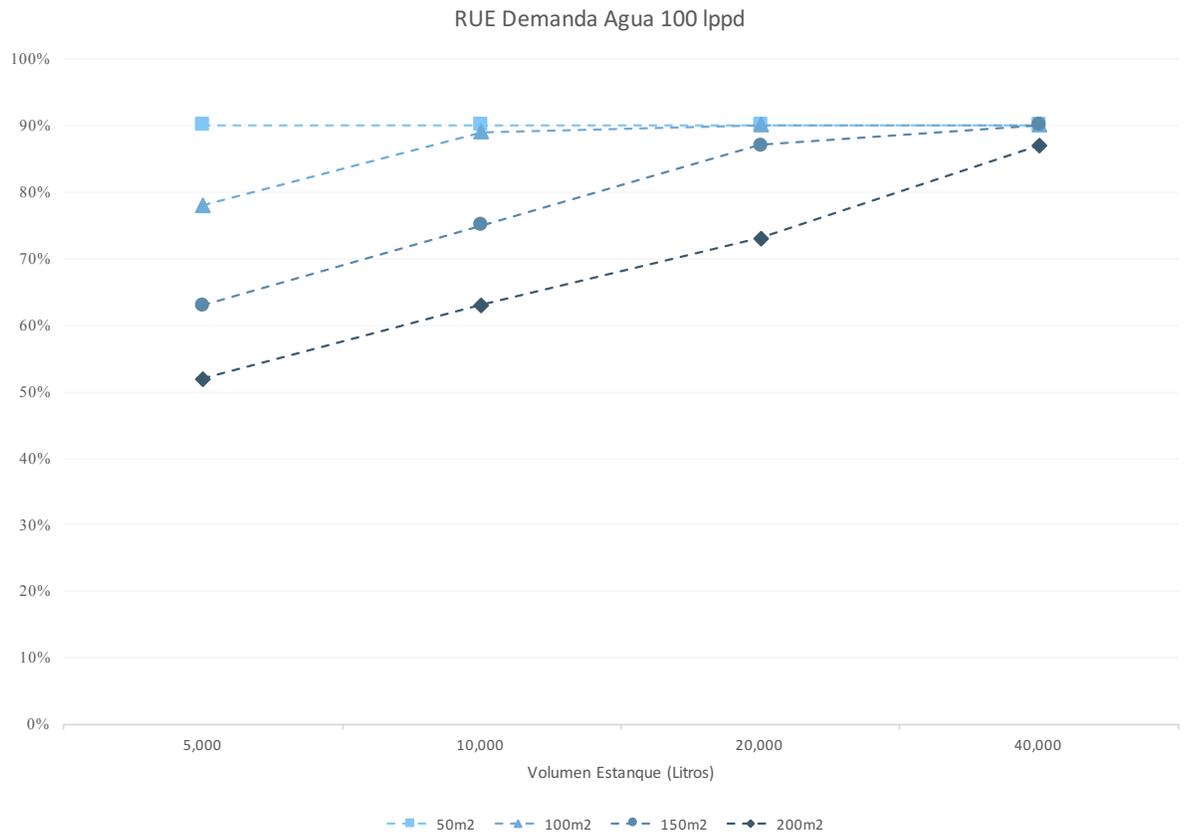


fig 3.5 a y b
 Variación en eficiencia de uso de agua lluvia (RUE) con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd. (Elaboración propia desde método Mun & Han, 2012).

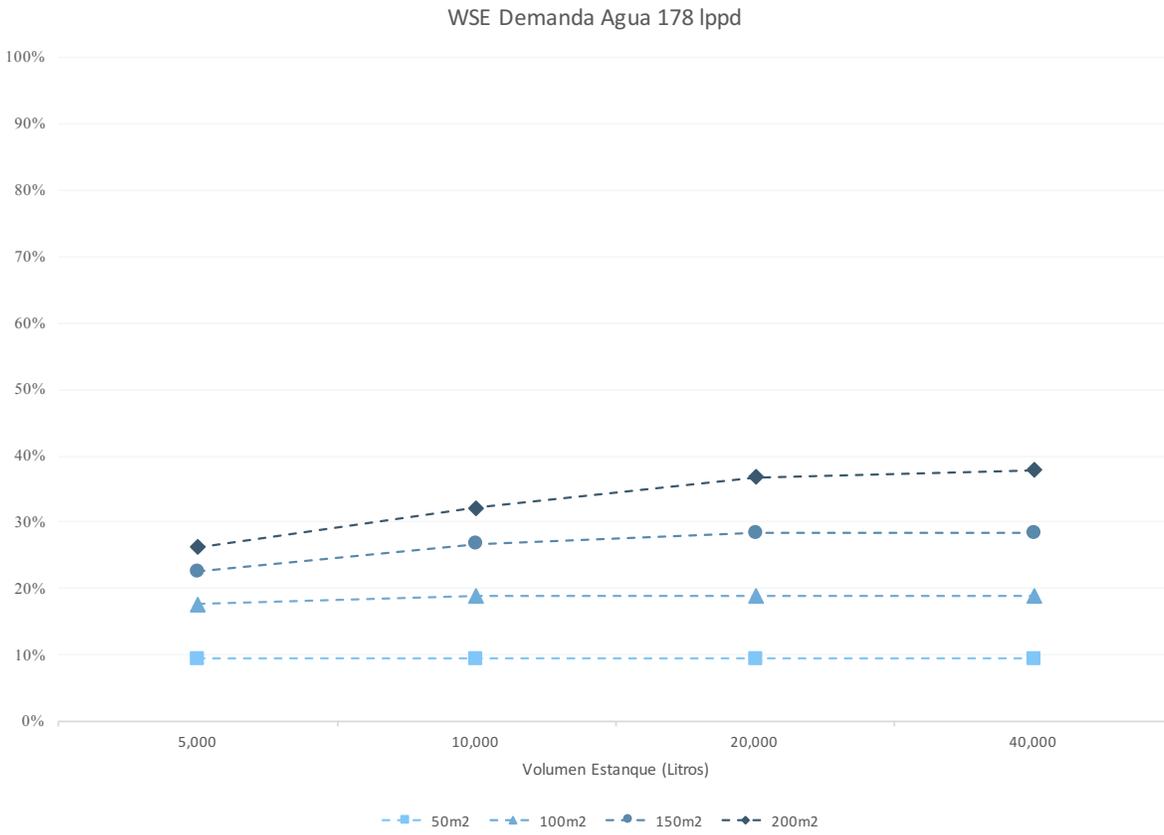
(a)



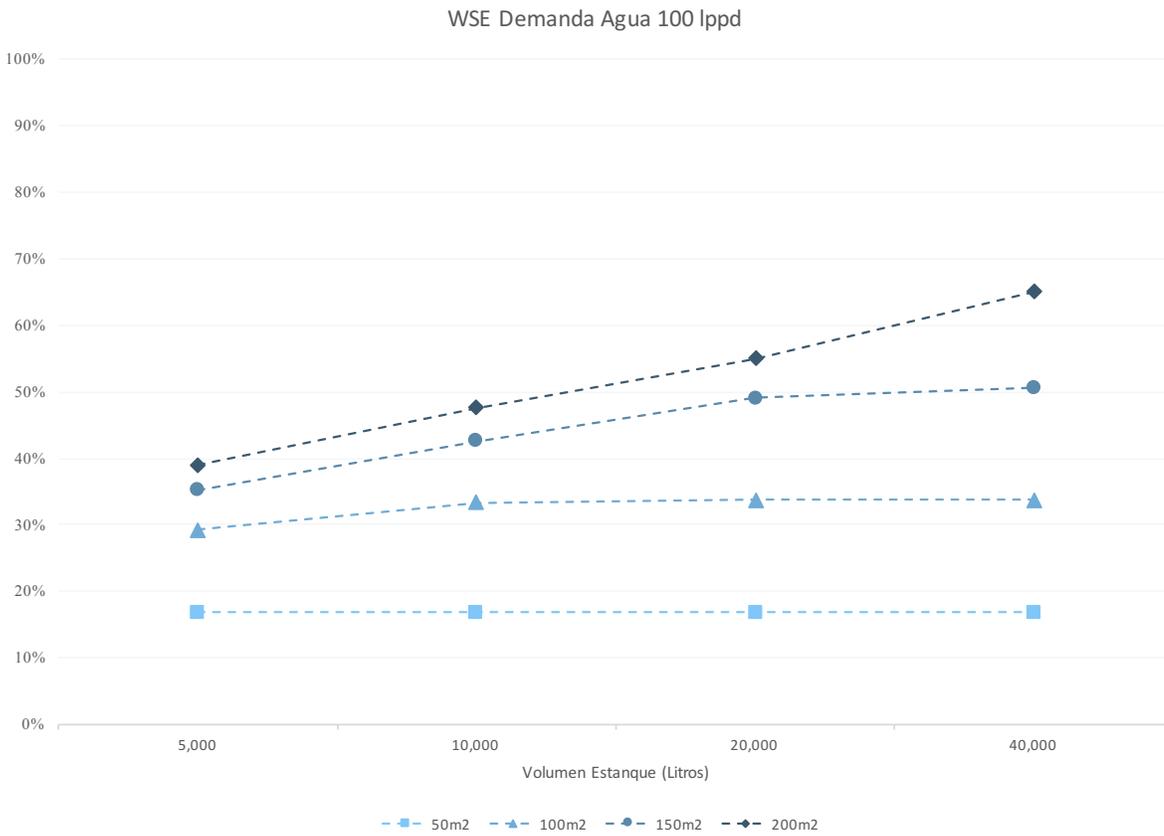
(b)



(c) fig 3.6 c y d
 Variación en eficiencia de ahorro de agua (WSE) con distintos tamaños de superficie de captación y volumen de tanque con demanda de 535 lpcd. (Elaboración propia desde método Mun & Han, 2012).



(d)



3.3 Desempeño Vivienda con Sistema de Híbrido

En la elaboración de esta simulación se descubre que para lograr cubrir el 100% de la demanda de agua de las viviendas con agua lluvia, se necesitaría una superficie de captación de aproximadamente 525 m² por vivienda en la situación actual, o de 300 m² en una situación ideal, por lo que en áreas residenciales de una ciudad con densidades como las de Casablanca, se recomienda agregar métodos suplementarios de ahorro de agua para lograr cubrir mayores porcentajes de la demanda anual.

Se concluye de la simulación, que en viviendas como las que se construyen el día de hoy en Casablanca, menores a 140 m² construídos, con una cubierta de 150 m² es posible abastecer un rango de 28% a un 50% de la demanda actual de agua. El agua se puede

destinar para usos exclusivamente no potables (recarga de inodoros, lavado de ropa y autos e irrigación), sin embargo, como se menciona en los capítulos 1.2.1 y 1.2.3, con el tratamiento adecuado, es posible utilizar esta agua como agua potable. Además de esto, investigaciones sobre el beneficio medioambiental en el ahorro de agua concluyen que la estrategia más favorable en casos de viviendas unifamiliares son los sistemas híbridos de captación de agua lluvia y reciclaje de aguas grises (Leong, Oh, Poh & Chong, 2017; Marinoski, Ghisi, 2019). Esto se debe a que el agua lluvia captada aumenta la oferta de agua y reemplaza el uso de agua potable en déficit y el sistema de reciclaje de aguas grises permite la reutilización del agua para usos no potables, reduciendo aún más la

demanda de agua tratada de la ciudad y, a la vez, reduciendo también la devolución de agua al alcantarillado, volviendo más eficiente el ciclo del agua dentro de la vivienda.

En el caso de la ciudad de Casablanca, en el periodo de tiempo simulado y una cubierta de 150 m², la demanda actual de agua potable se vería reducida de 535 litros por cliente al día, a aproximadamente 383 litros por cliente al día cuando se le agrega un sistema de captación de agua lluvia y se reduciría aún más a 222 litros por cliente al día cuando se complementa con un sistema de reciclaje de aguas grises (según los resultados de Leong et al., 2017; Mandal et al., 2011; Marinoski & Ghisi, 2019; Revitt, et al., 2011), lo que significaría una reducción en 59% del total.

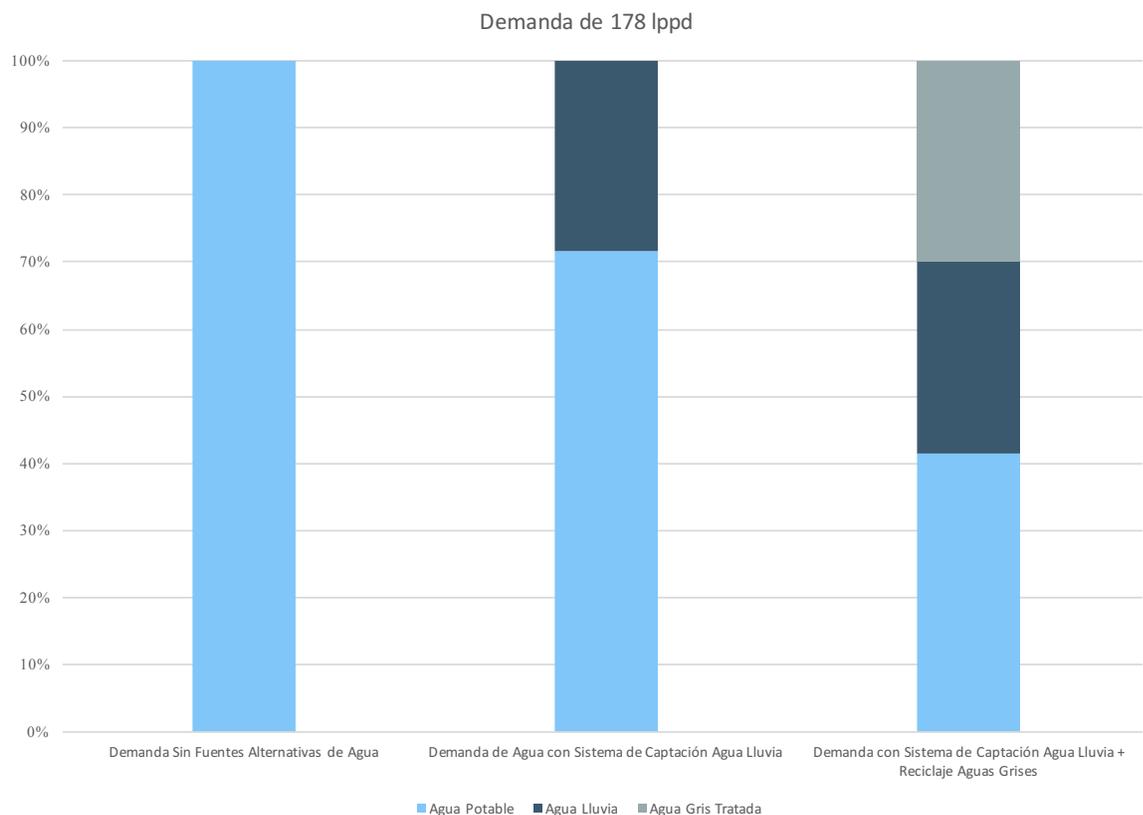


fig 3.7
Estimado de disminución de demanda de agua potable de la red, reemplazada con agua lluvia y aguas grises recicladas.
(Elaboración propia)

Este resultado se consigue si se toma la demanda actual de agua en las viviendas de la ciudad, según los datos levantados por ESVAL. Si se toma una demanda reducida hasta lo mínimo sugerido por la OMS de 100 litros por persona al día (o 300 en una vivienda de 3), se puede reducir los 300 litros iniciales a 148.2 litros por cliente al día con un sistema de captación de agua lluvia y a 58.2 litros de agua tratada de la ciudad por cliente al día con un sistema híbrido, significando una reducción en 81% de la demanda inicial.

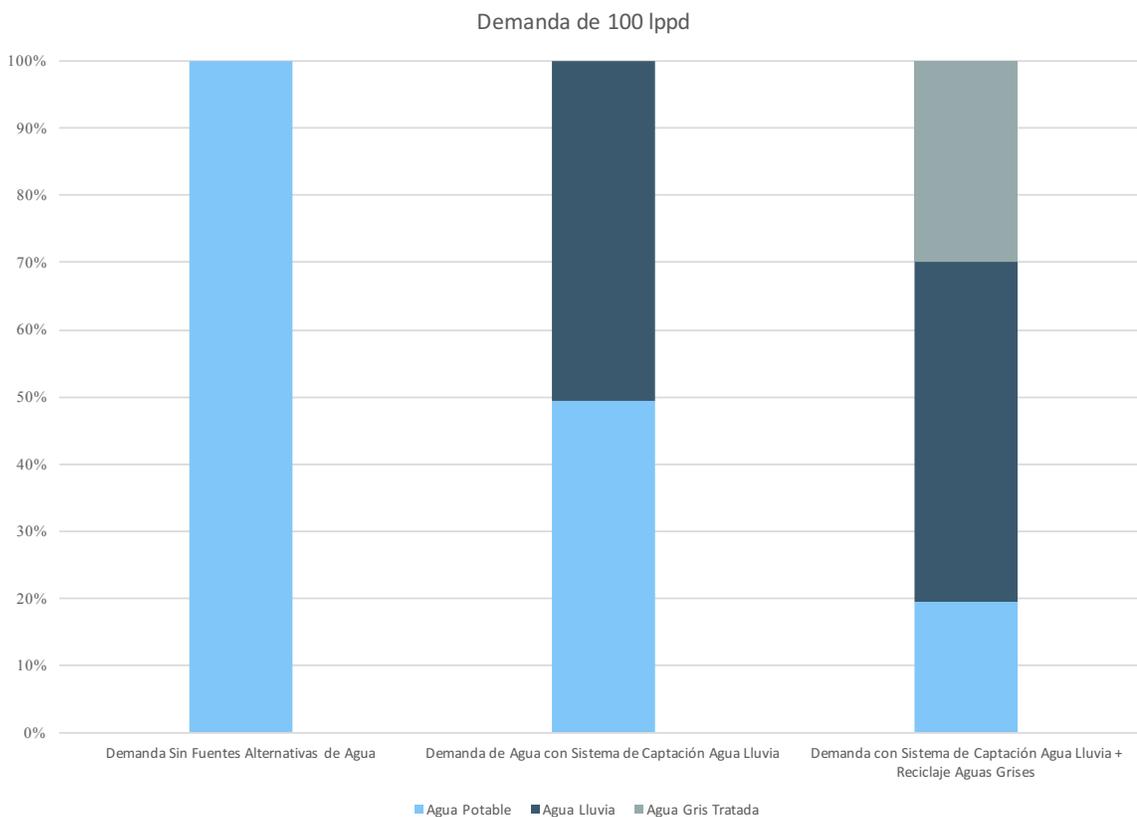


fig 3.8
 Estimado de disminución de demanda de agua potable de la red, reemplazada con agua lluvia y aguas grises recicladas.
 (Elaboración propia)

3.4 Estrategias para Proyecto Conjunto de Viviendas

A partir de esta investigación, se puede elaborar un modelo de conjunto de viviendas para Casablanca que utilice un sistema de captación de agua lluvia para mitigar los problemas a los que se enfrenta la comuna y región en las próximas décadas a distintas escalas de vivienda, conjunto y ciudad.

Los problemas nacen del cambio climático evidenciado en el siglo XXI y han limitado la capacidad de crecimiento de las comunas de la región debido al déficit en la disponibilidad de agua. Es por esto que se debe empezar a promover la descentralización del sistema hídrico en las viviendas, proveyendo a las viviendas con agua captada in situ, ahorrando costos de instalaciones y disminuyendo la demanda de agua

total para la ciudad.

Las viviendas construidas en Casablanca recientemente son unifamiliares que se mantienen bajo 140 m² y como indica la actualización al plan regulador, se busca mantener la imagen histórica de Casablanca de viviendas no mayores a dos pisos y evitar áreas residenciales altamente densificadas.

Los componentes esenciales en los sistemas de captación de agua lluvia son las cubiertas, las canaletas y los estanques, por lo que estas cumplirían un rol primordial en el diseño de un conjunto de viviendas.

Las cubiertas deben ser de un material poco poroso con un alto coeficiente de escorrentía (principalmente

policarbonatos y metales inoxidables) y contar con una pendiente mayor a 5% para minimizar pérdidas de agua. Se sugiere también evitar la complejización del sistema, ya que esto puede aumentar porcentajes de pérdidas, por lo que la función del diseño de la cubierta debe ser dirigir el agua a los estanques de manera directa, minimizando la necesidad de canaletas.

Las canaletas frecuentemente acumulan obstrucciones que amenazan con provocar pérdidas y contaminar el agua, por esto se debe considerar las dimensiones para evitar el bloqueo de los ingresos y desechos de agua y la facilidad de la limpieza frecuente de las canaletas del sistema. Las canaletas en un conjunto de vivienda que recolecta el agua lluvia

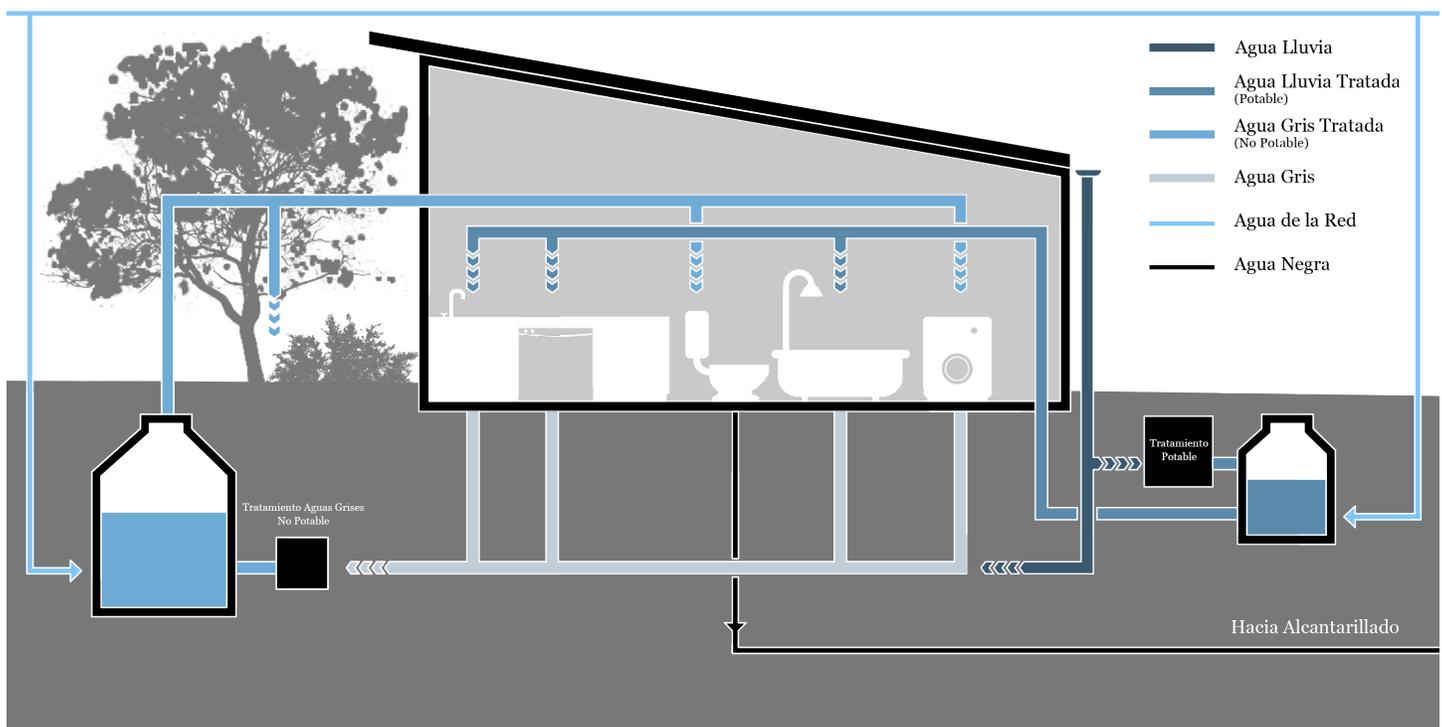
fig. 3.9
Esquema de ciclo de uso de agua en una vivienda, utilizando agua lluvia, aguas grises y agua de la red.
(Elaboración propia)

deben transportar el agua desde las cubiertas hasta los estanques, como también considerar la escorrentía que ocurriría en los suelos pavimentados del conjunto en eventos de lluvia. Se puede aprovechar esta agua de tormenta para transportarla desde los suelos duros del proyecto a las áreas verdes plantadas por medio de canaletas.

Para aumentar la eficiencia de este sistema se sugiere separar la captación de agua en dos estanques con distintos tratamientos, uno para uso como agua potable, que debe cubrir el 30% del total de la demanda (consumo, higiene y lavado de platos) y otro para uso como agua no potable, que debe cubrir 70% de la demanda total de agua (recarga de inodoros lavado de ropa y auto e

irrigación). En el capítulo anterior, se concluye que en una vivienda de Casablanca con una cubierta de 150 m², se necesitaría un estanque de 20 m³ para lograr aprovechar el total de las precipitaciones del año, sin embargo, a este se le podría agregar otro estanque de aproximadamente 2.5 m³ para separar las aguas potables de las no potables. Para optimizar el ciclo de agua en la vivienda, se puede agregar también un sistema de reciclaje de aguas grises, haciendo un sistema híbrido donde la captación de agua lluvia aumenta la oferta de agua en la vivienda y el sistema de reciclaje disminuye la demanda al reutilizar las aguas para usos no potables y disminuye los desechos devueltos a la red de alcantarillados de la ciudad.

Incluir estas estrategias de diseño en la elaboración de un conjunto de viviendas beneficia a las viviendas individualmente, reduciendo la dependencia de la red hídrica de la ciudad, bajando costos y a la vez, aumentando la oferta de agua disponible durante el año. Beneficia al conjunto cuando se diseña en torno al trayecto de los distintos tipos de aguas, reduciendo costos de irrigación y beneficia a la ciudad y medio ambiente mitigando posibles futuras inundaciones al captar gran parte de la lluvia que de otra forma provocaría grandes escorrentías y a la vez, promoviendo la recarga de las aguas subterráneas al regar con las aguas de tormenta y finalmente minimizando las aguas devueltas al alcantarillado de la ciudad.



CONCLUSIONES

La práctica de recolectar el agua de lluvia es algo que existe desde muy temprano en la historia de la civilización humana, sin embargo, al desarrollarse los avances tecnológicos en infraestructuras de ciudades, se encontraron maneras más eficientes de tratar el agua y llevarla a más viviendas y se dejó de lado la cultura de acumular agua lluvia.

Actualmente, debido a la presión que se está enfrentado a causa del agotamiento del recurso hídrico, existe un mayor enfoque hacia la sustentabilidad y por esta razón, países que corren el riesgo en las próximas décadas de sufrir escasez, han desarrollado la captación de agua lluvia en viviendas nuevas en busca de maneras de descentralizar el sistema de instalaciones sanitarias y dotar a las viviendas con un acceso secundario permanente a agua, que serviría para disminuir la demanda de agua potable, adquirida mediante extracciones subterráneas o superficiales, y a la vez, aumentar la oferta.

Por otro lado, países tropicales con una mayor disponibilidad de agua han encontrado valor en la misma práctica, ya que, como las precipitaciones anuales son altas, es posible que la recolección de agua lluvia se convierta en la única fuente de agua para estas viviendas, lo que en poblaciones rurales que cubren extensos territorios con una baja densidad de población, no sería necesaria una costosa red sanitaria que las conecte a todas viviendas.

A partir de esto, los desarrollos tecnológicos de las últimas décadas han permitido la optimización de este tipo de sistemas debido a una mayor eficiencia en la captación de agua lluvia, mejor tratamiento para alcanzar un mayor grado de pureza y con instalaciones que desperdician menos agua, logrando ahorrar grandes cantidades de agua.

Dentro de las ciudades urbanas, existe un valor en ocupar la superficie de las cubiertas de las viviendas para captar agua lluvia debido a que estas conforman un porcentaje significativo de las superficies selladas de una ciudad, que no permiten la absorción del agua a la superficie. Se ha demostrado que, con precipitaciones anuales mayores a 300 mm y una superficie de cubierta mayor a 50 m² puede resultar en la disminución de demanda de agua potable en la vivienda en un porcentaje significativo y con una superficie de 150 m² puede obtener una reducción de aproximadamente la mitad de la demanda de agua potable.

Es importante incluir los sistemas de captación de agua lluvia en la etapa de diseño de los proyectos de vivienda dado que así se puede evitar la instalación posterior de bombas costosas y se puede asegurar que el agua sería eficientemente usada sin necesidad de intervención humana, además de facilitar el tratamiento de aguas para la reutilización. De esta forma se pueden abarcar los principales usos del agua en la vivienda desde acumulación, recarga de agua en los baños y finalmente ser usada en riegos para devolver la menor cantidad de agua a los

sistemas de alcantarillado de la ciudad y minimizar la demanda de agua potable en las viviendas.

Además de aumentar la oferta de agua, para alcanzar una optimización en la efectividad de sistemas de captación de agua lluvia para viviendas es necesario reducir la demanda por persona y que el agua sea utilizada de una manera eficiente, minimizando desperdicios. Es por esto que los sistemas de captación de agua lluvia son más efectivos cuando se complementan con un sistema de tratamiento y reciclaje de aguas grises que ayudarían a reducir aún más la demanda de agua potable de las viviendas.

La comuna de Casablanca ha tenido un aumento constante en la demanda de agua, debido al aumento de las poblaciones de las localidades, y ha sufrido una disminución importante de la oferta de agua debido a la creación de más viñedos y plantaciones de frutas y verduras. Es por esto que es importante dotar a las viviendas de Casablanca con una fuente secundaria de agua que sea suplementaria a la red de ESVAL en tiempos de sequía.

Debido a que periodos largos sin lluvia son comunes en Casablanca, para la optimización de los sistemas de captación de agua lluvia es importante que los tanques de agua sean capaces de acumular el agua de los meses de lluvia para el resto del año, para minimizar pérdidas por desbordamiento. Esto significa que una superficie de acumulación de 50 m² no necesita más de 5 m³ de tanque, pero para un área de acumulación de 200 m² se necesitan más de 40 m³ para lograr la optimización del sistema.

Se concluye tras las simulaciones elaboradas, que es beneficioso para los proyectos de vivienda que se planean construir en la ciudad no solo incluyan sistemas de captación de agua lluvia en la concepción del diseño, sino que también esta sea complementada con sistemas secundarios de ahorro de agua (reciclaje de aguas grises e instalaciones eficientes en el uso de agua). Al incluir un sistema de captación de agua lluvia, la demanda de agua de la vivienda puede ver reducida en un 28% a un 50%, sin embargo, al incluir estos sistemas secundarios, esta reducción puede alcanzar 60% o incluso 80%.

El agua lluvia es algo que actualmente no se aprovecha para las viviendas de la Quinta Región, por lo que incorporar sistemas de captación de agua lluvia en el diseño de las viviendas y proyectos ayudaría a disminuir el estrés hídrico que existe el día de hoy en la ciudad y región y beneficiar no solo a la vivienda individual, sino al desarrollo de la ciudad, al reducir los volúmenes de escorrentía de agua tormenta en los futuros eventos de lluvia y al promover la reabsorción del agua en la superficie de la zona, mitigando la actual desertificación de la región.

REFERENTES

- Abdulla, F. Al-Shareef, A. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243, 195-207. doi:10.1016/j.desal.2008.05.013
- Agromet (2019). Reportes históricos estación Casablanca. Disponible en: <https://www.agromet.cl/reportes-historicos>
- Ahamed, M. Meera V. (2006). Iron hydroxide-coated sand filter for household drinking water from roof-harvested rainwater. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 6, 52, 1-7.
- Ahmed, W. Vieritz, A. Goonetilleke, A. Gardner, T. (2010). Health risk from the use of roof-harvested rainwater in southeast Queensland, Australia, as potable or non-potable water, determined using quantitative microbial risk assessment. *Applied and Environmental Microbiology*, Nov, 2010, 7382-7391 doi:10.1128/AEM.00944-10
- Al-Jayyousi, O. (2003). Greywater reuse: Towards sustainable water management. *Desalination*, 156, 181-192. doi:10.1016/S0011-9164(03)00340-0.
- Alam, M. Adeboye, O. Rayburg, S. Shanableh, A. (2012). Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. *Resources, Conservation and Recycling*, 62, 51-55. doi:10.1016/j.resconrec.2012.02.007
- Amin, M. Han, M. (2009). Roof- harvested rainwater for potable purposes: Application of solar collector disinfection (SOCO-DIS). *Water Research*, 43, 5225-5235 doi:10.1016/j.watres.2009.08.041
- Archdaily. (2016). *MM house / OHLAB*. Disponible en: <https://www.archdaily.com/797598/mm-house-ohlab>
- Bárcena, A. Prado, A. Samaniego, J. & Pérez, R. (2012). *La economía del cambio climático en Chile*. Santiago de Chile, Chile: CEPAL.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, (2012). *Informe sequía quinta región*. Santiago de Chile, Chile.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, (2019). *Clima y vegetación región de Valparaíso*. Disponible en <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region5/clima.htm>
- Biohabitats (2019). Nelson, A. *Biohabitats Projects, Places & People*. Disponible en: https://www.biohabitats.com/newsletter/the-living-building-challenge/_biohabitats-projects-places-people/
- Budds, J. (2009). Contested H2O: Science policy and politics in water resources management in Chile. *Geoforum*, 40, 418-430.
- Budds, J. (2012). La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: Un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de geografía norte grande*, 54, 167-184.
- Budds, J. (2018). Securing the market: Water security and the internal contradictions of Chile's water code. *Geoforum*. doi:10.1016/j.geoforum.2018.09.027
- Che-Ani, A. Shaari, N. Sairi, A. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water supply in the future. *European Journal of Scientific Research*, 34, 132-140.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2012). *La economía del cambio climático en Chile*. Santiago de Chile, Naciones Unidas.
- Dili, A. Naseer, M. Zacharia, T. (2010). Passive environment control system of Kerala vernacular residential architecture for a comfortable indoor environment: A qualitative and quantitative analyses. *Energy and Buildings*, 42 917-927 doi:10.1016/j.enbuild.2010.01.002
- Domènech, L. Saurí, D. (2011) A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19, 598-608. doi:10.1016/j.jclepro.2010.11.010
- Donner, E. Eriksson, E. Revitt, M. Scholes, L. Lützhöft, H.C. Ledin, A. (2010). Presence and fate of priority substances in domestic greywater treatment and reuse systems. *The Science of the total environment*, 408, 2444-51. doi:10.1016/j.scitotenv.2010.02.033.
- EME Group (2005) *Water conservation in architecture*. Final report. Disponible en: https://waterportal.com.au/swf/images/swf-files/103-designing-environmentally-sustainable-houses-and-apartments-_final_evaluation_report.pdf
- Energy Saving Trust (2013) *At home with water*. Disponible en: <https://energysavingtrust.org.uk/sites/default/files/reports/AtHomewithWater%287%29.pdf>
- Environmental Agency UK (2008). *Harvesting rainwater for domestic uses: An information guide*. Disponible en: <https://waterwise.org.uk/knowledge-base/harvesting-rainwater-for-domestic-uses-an-information-guide-2010/>
- ESVAL. (2019) *Tabla de proyección de demanda de agua potable en Casablanca*. Enviado por jefe departamento de planificación de infraestructura de ESVAL.
- Farreny, R. Morales-Pinzón, T. Guisasaola, A. Tayà, C. Rieradevall, J. Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*, 45, 3245-3254 doi:10.1016/j.watres.2011.03.036
- Fountoulakis, M. Markakis, N. Petousi, I. Manios, T. (2016). Single house on-site grey water treatment using a submerged membrane bioreactor for toilet flushing. *Science of The Total Environment*, 551-552, 706-711. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.02.057.
- Ghaitidak, D. Yadav, K. (2013). Characteristics and treatment of greywater – A review. *Environmental science and pollution research international*, 5, 2795-2809. doi:10.1007/s11356-013-1533-0
- Ghisi, E. Leite, E. (2012). Potable water savings by using rainwater for non-potable uses in houses. *Water*, 4, 607-628. doi:10.3390/w4030607
- Gnadlinger, J. (2007). P1MC and P1+2, two community based rainwater harvesting programs in semi-arid Brazil. *Rainwater and Urban Design 2007. Engineers Australia*, 2007: 314-322.
- Gobierno de Chile. (2015). *Plan nacional adaptación al cambio climático*. Santiago de Chile, Chile.
- Gobierno de Chile. (2017). *Plan de acción nacional de cambio climático, 2017-2022*.
- Goonetilleke, A. Thomas, E. Ginn, S. Gilbert, D. (2005). Understanding the role of land use in urban storm water quality management. *Journal of Environmental Management* 74, 31-42.
- Government of South Australia (2009) *Water and the environment. Rainwater tanks and the building regulations*.
- Gutterslondon (2015). Wheaty, F. *Living Off the Grid of Public Water Supply*. Disponible en: <https://www.gutterslondon.co.uk/living-off-grid-public-water-supply/>
- Henriquez, C. Aspee, N. & Quense, J. (2016). Zonas de catástrofes por eventos hidrometeorológicos en Chile y aportes para un índice de riesgos climáticos. *Revista de geografía norte grande*, 66, 27-44.
- Herman, T. Schmida, U. (1999) Rainwater utilisation in Germany: Efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. *Urban Water*, 307-316.
- Hossein, M. Saghafian, B. Haghghi, F. (2013) Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three Climate conditions. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 86-93 doi:10.1016/j.resconrec.2013.01.015
- Instituto Nacional de Estadísticas, (2017). *Compendio estadístico. Santiago de Chile*, Chile. Disponible en: <http://www.conama10.conama.org/conama10/download/files/CT%202010/41008.pdf>
- Instituto Politécnico Nacional (2010). *Captación de agua de lluvia, alternativa sustentable*. Duran, E. Comunicación técnica, CONAMA 10
- Intendencia Valparaíso (2019). *Presidente de la república decreta zona de catástrofe por sequía a todas las comunas continentales de la región de Valparaíso*. Disponible en: <http://www.intendenciavalparaiso.gov.cl/noticias/presidente-de-la-republica-decreta-zona-de-catastrofe-por-sequia-a-todas-las-comunas-continentales-de-la-region-de-valparaiso/>
- International Water Association. (2016). Specific water consumption for households for the capital cities. Disponible en: <http://waterstatistics.iwanetwork.org/graph/19>
- Islam, M. Chou, F. Kabir, M. Liaw, C. (2010). Rainwater: A potential alternative source for scarce safe drinking and arsenic contaminated water in Bangladesh. *Water Resource Management*, 24:3987-4008 doi:10.1007/s11269-010-9643-7
- Khoo, T. C. (2009). Singapore water: yesterday, today and tomorrow. *Water Management in 2020 and Beyond* 237-250. Springer Berlin Heidelberg.
- Leong, J.Y.C. Oh, K. S. Poh, P. E. Chong, M.N. (2017) Prospects of hybrid rainwater-greywater decentralised system for water recycling and reuse: A review, *Journal of Cleaner Production*, 142 (4), 3014-3027 doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.167.
- Liuzzo, L. Notaro, V. Freni, G. (2016). A reliability analysis of a rainfall harvesting system in southern Italy. *Water*, 8, 18 doi:10.3390/w8010018
- Luo, T., R. Young, P. Reig. (2015). *Aqueduct Projected Water Stress Country Rankings*. Technical Note. Washington, D.C.: World Resources Institute. Disponible en: www.wri.org/publication/aqueduct-projected-water-stress-country-rankings
- Mandal, D. Labhasetwar, P. Dhone, S. Dubey, A. Shinde, G. Wate, S. (2011). Water conservation due to greywater treatment and reuse in urban setting with specific context to developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 356-361. doi:10.1016/j.resconrec.2010.11.001.
- Marinoski, A.K. Ghisi, E. (2019) Environmental performance of hybrid rainwater-greywater systems in residential buildings, *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 100-114 doi:10.1016/j.resconrec.2019.01.035.
- Mays, L. Antoniou, G. P. Angelikas, A. N. (2013) History of water cisterns: legacies and lessons. *Water*, 5, 1916-1940. doi:10.3390/w5041916

- Meera, V. Ahammed, M. (2006) Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: a review. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*. 6, 21, 1-13.
- Melville-Shreeve, P. Ward, S. Butler, D (2016) Rainwater Harvesting Typologies for UK Houses: A Multi Criteria Analysis of System Configurations, *Water*, 8(4), 129.
doi:10.3390/w8040129
- Meteoblue. (2019). Clima Palma. Disponible en: https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/climatemodelled/palma_spain_2512989
- Mirahmadi, F. Altan, H. (2018). A solution for future designs using techniques from vernacular architecture in southern Iran. *Sustainable Buildings*. 3, 1.
doi:10.1051/sbuild/2017007
- Ministerio del Desarrollo Urbano y Suministro de Agua de Sri Lanka (2005). *National rainwater policy and strategies*. Disponible en: http://lankarainwater.org/wp/?page_id=70
- Ministerio de Salud de Chile. (2018). *Proyecto de reglamento sobre condiciones sanitarias básicas para la reutilización de aguas grises*. Disponible en: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/02/Reglamento-Aguas-Grises.pdf>
- Montes, M. (2008). Avances en la Gestión Integral del Agua Lluvia (GIALL): contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de Lluviatl en México. *Revista Internacional de sostenibilidad, tecnología y humanismo*. 3, 39-57.
- Mun, J.S. Han, M.Y. (2012). Design and Operational Parameters of a Rooftop Rainwater Harvesting System: Definition, Sensitivity and Verification. *Journal of environmental management*. 93, 147-53.
doi:10.1016/j.jenvman.2011.08.024.
- Municipalidad de Casablanca (2019). *Memoria explicativa de plan regulador de Casablanca*. Disponible en: <https://municipalidadcasablanca.cl/index.php/ unidades-municipales/plan-regulador>
- Naciones Unidas. (2012). *La economía del cambio climático en Chile*. Santiago de Chile, Chile: Naciones Unidas.
- Nolde, E. (2000). Grey Water Reuse Systems for Toilet Flushing in Multi-Storey Buildings – over Ten Years Experience in Berlin. *Urban Water*. 1, 275-284.
doi:10.1016/S1462-0758(00)00023-6
- OHlab. (2016) Casa MM Palma de Mallorca. Disponible en: <http://www.ohlab.net/project/casa-mm-2/>
- Organización Mundial de la Salud (2003). *Domestic water quantity, service, level and health*. Geneva, Switzerland: Howard, G. Bartram, J.
- Organización Mundial de la Salud (2013). *Technical notes for emergencies*. Note N° 9. New Delhi, India: Reed, B.
- Pandey, D. Gupta, A. Anderson, D. (2003). Rainwater harvesting as an adaption to Climate change. *Current Science*, vol. 85, N° 1
- Revitt, M. Eriksson, E. Donner, E. (2011). The implications of household greywater treatment and reuse for municipal wastewater flows and micropollutant loads. *Water research*. 45, 1549-60.
doi:10.1016/j.watres.2010.11.027.
- Ridder, T. Buishand, T. Reijnders, H. Hart, M. Slanina, J. (1985) Effects of storage on the composition of main components in rainwater samples. *Atmospheric Environment*. Vol. 19, 5, 759-762.
- Santibáñez, F. (2016). *Cambio climático y recursos hídricos de Chile*. Santiago de Chile, Chile: Ministerio de Agricultura.
- Schmidt, M. (2006). *The contribution of rainwater harvesting against global warming*, IWA Publishing, London, UK.
- Thomas, T. (1998). Domestic water supply using rainwater harvesting. *Building Research & Information*, 26:2, 94-101.
doi:10.1080/0961321983700.10
- Universidad de Chile. (2006). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. CONAMA.
- UNESCO (2015). *Manual de diseño y construcción de sistemas de aguas lluvias en zonas rurales de Chile*. Roberto Pizarro, Alejandro Abrazá, Carolina Morales, Ronald Calderón, Jaime Tapia, Pablo García, Miguel Córdova. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 36
- Water Research Foundation (2016) *Residential end uses of water, version 2*. Executive report. DeOreo, W. Disponible en: https://www.circleofblue.org/wp-content/uploads/2016/04/WRF_REU2016.pdf
- Weissenbacher, N. & Möllegger, E. (2009). Combined greywater reuse and rainwater harvesting in an office building in Austria: Analyses of practical operation. *Sustainable Sanitation Practice*. 10, 4-9.
- Wilbers, G. Sebesvari, Z. Rechenburg, A. Renaud, F. (2013). Effects of local and spatial conditions on the quality of harvested rainwater in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Pollution*. 182, 225-232.
doi:10.1016/j.envpol.2013.07.019
- Yannopoulos, S. Giannopoulou, I. Kaiafa-Saropoulou, M. (2019). Investigation of the current situation and prospects for the development of rainwater harvesting as a tool to confront water scarcity worldwide. *Water*. 11, 2168.
doi:10.3390/w1102168

ANEXOS



Sitio - Casablanca



Planta Trazado



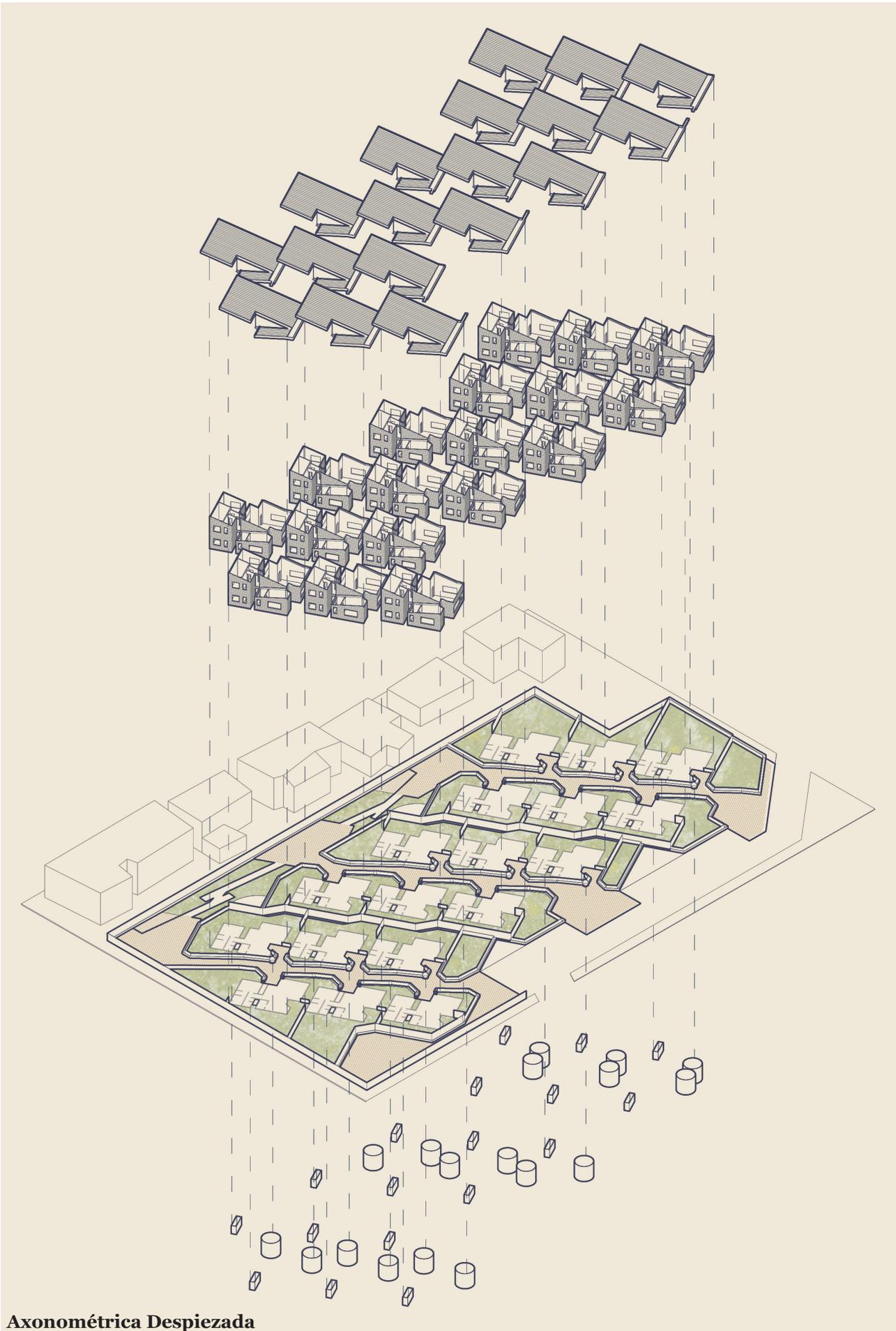
Planta Conjunto



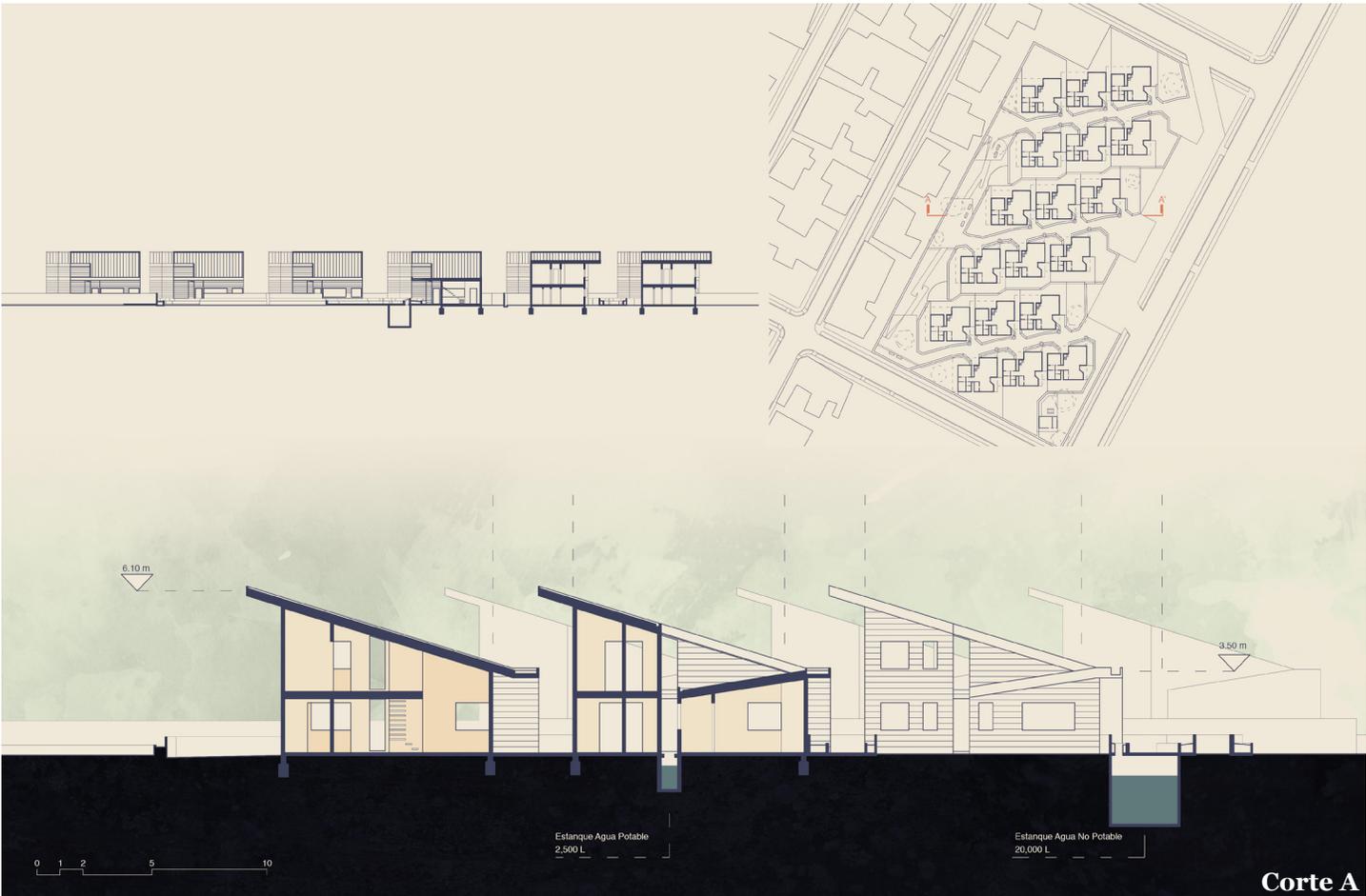
Planta Viviendas



Planta Cubiertas

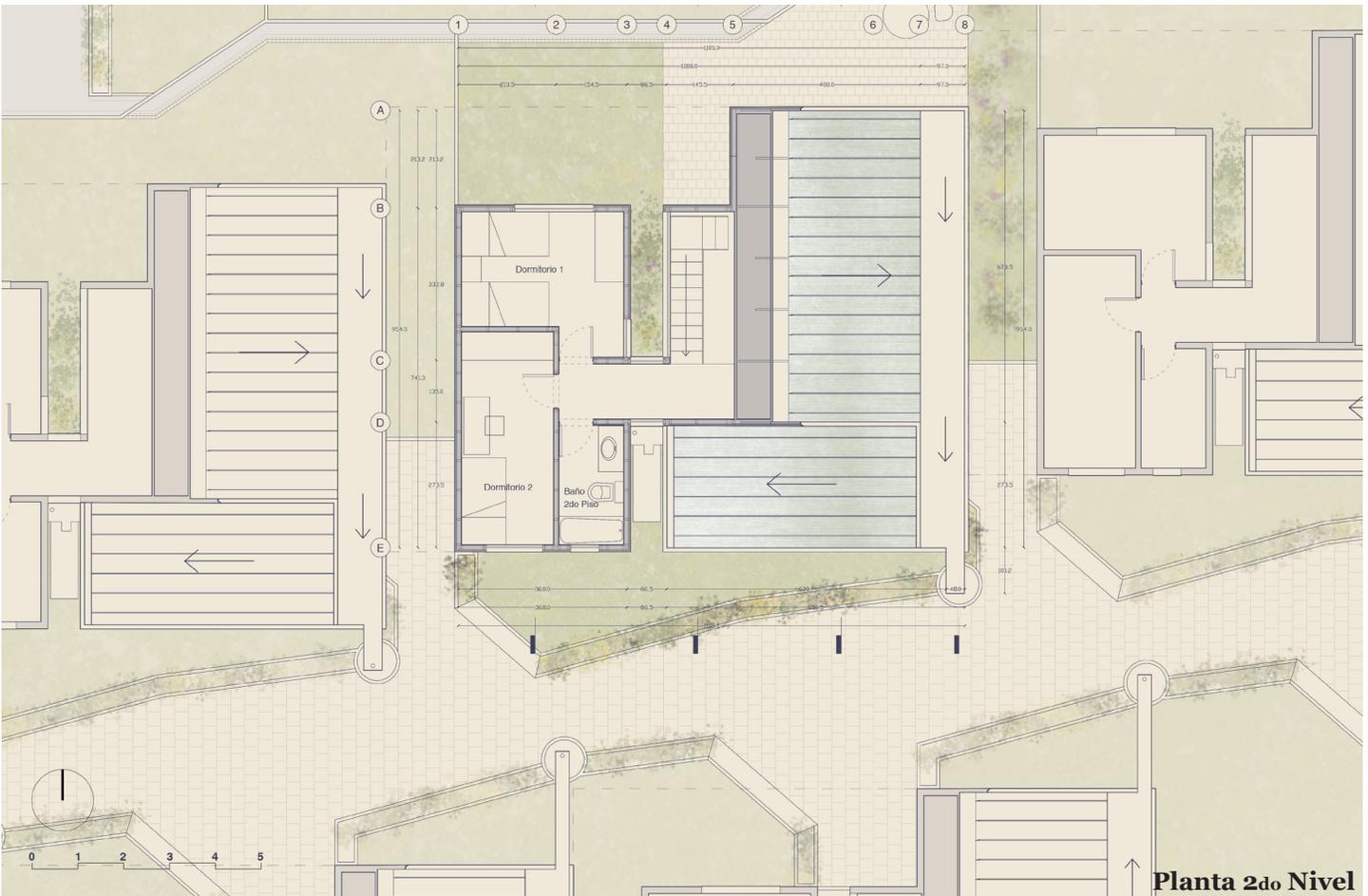


Axonométrica Despiezada





Planta 1er Nivel



Planta 2do Nivel

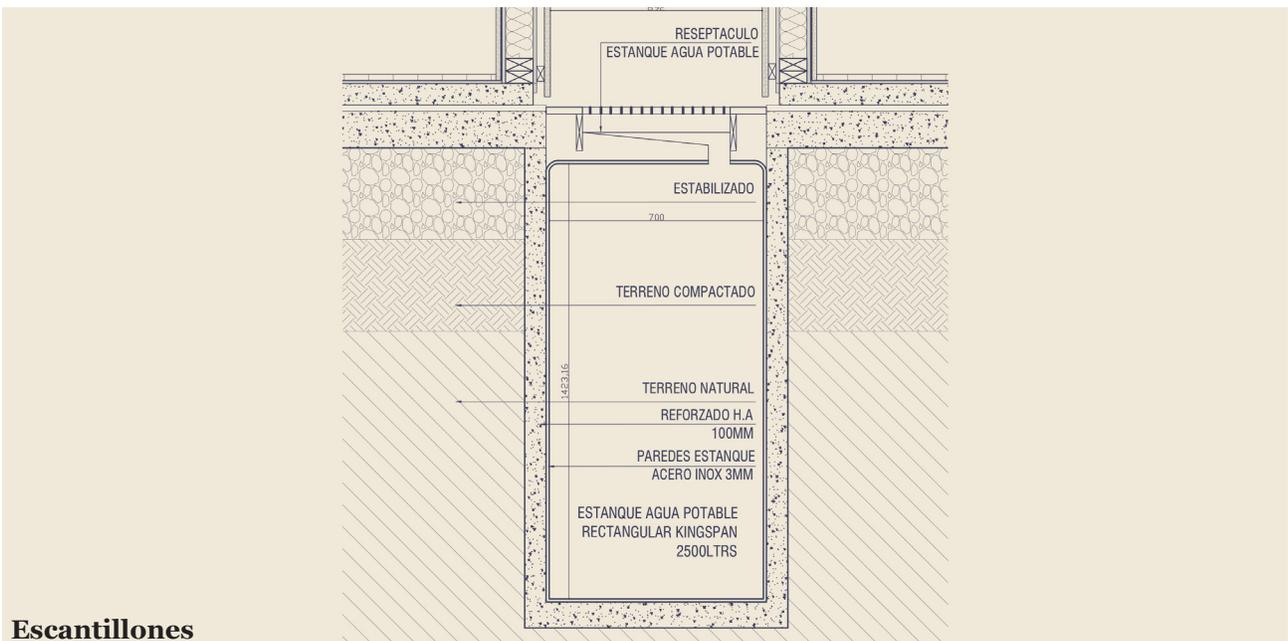
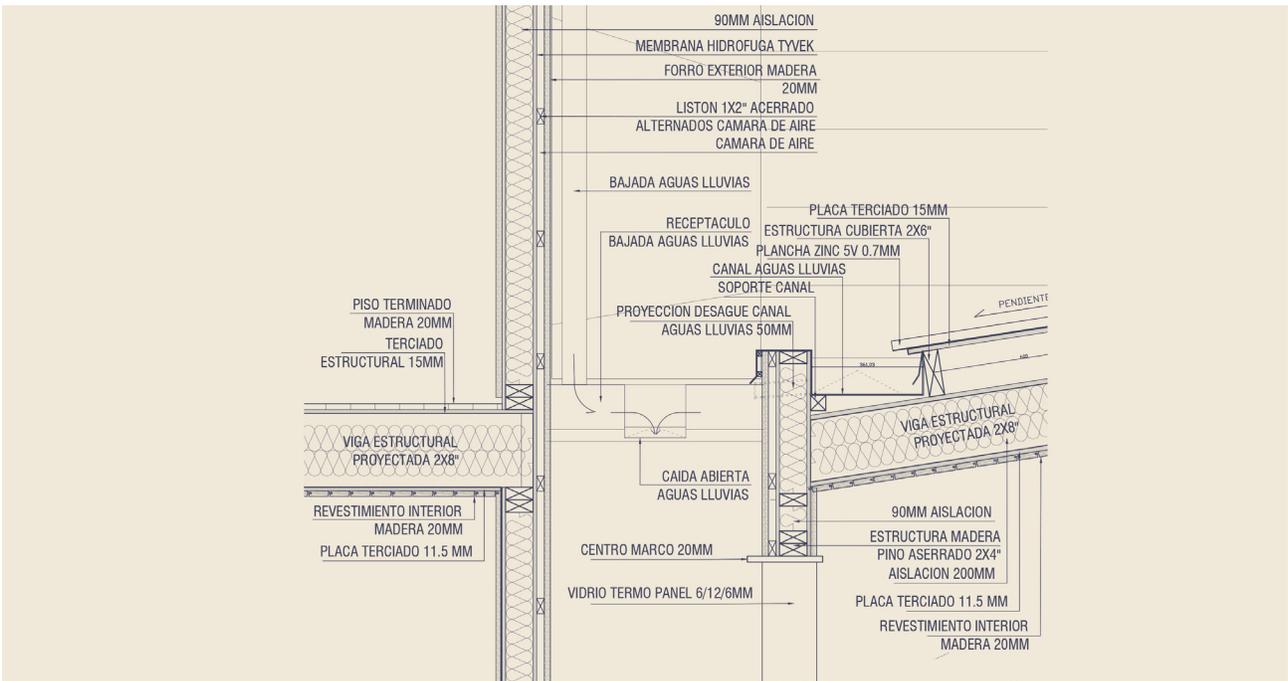
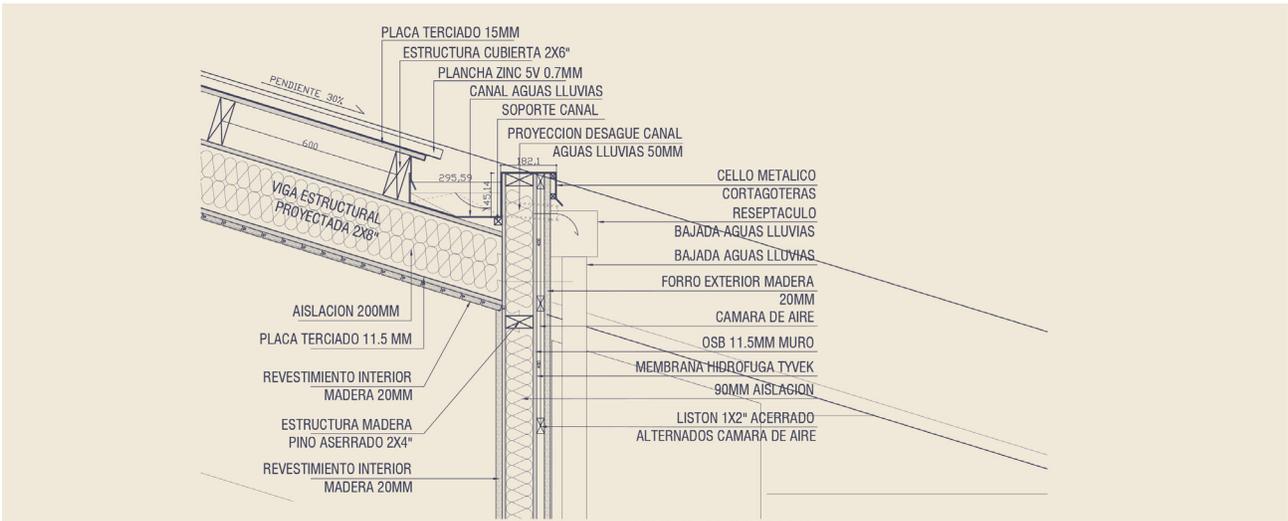


Diagrama Resumen Ciclo Hídrico

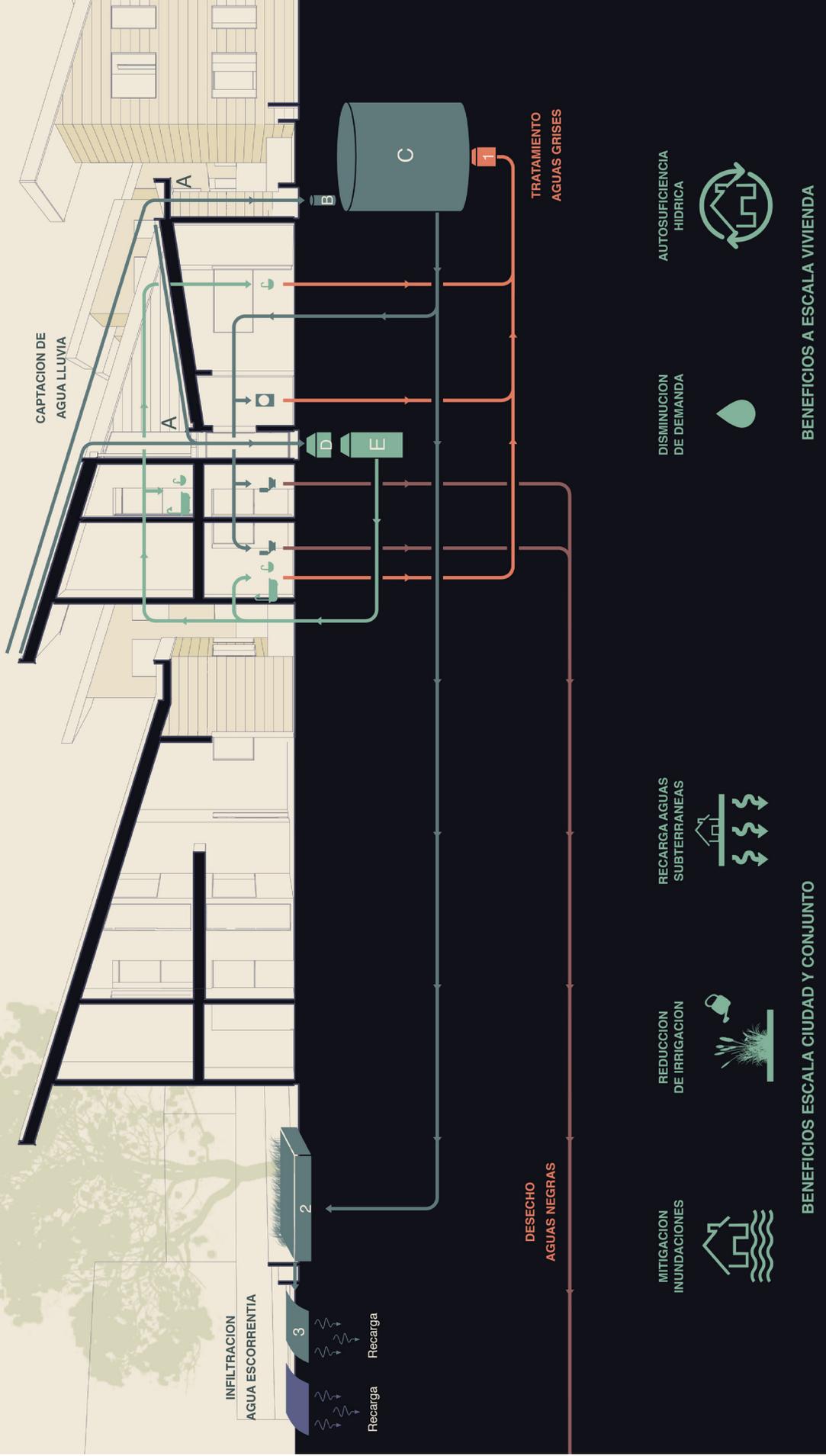
(Basado en Biohabitats, 2019)

TRATAMIENTO AGUAS GRISES

1 Tratamiento primario para estanque

CAPTACION AGUA LLUVIA

- A Bajadas de agua para recolección de agua lluvia
- B Filtración de entrada
- C Estanque agua, no potable 20,000 L
- D Filtración + desinfección UV para agua potable
- E Estanque agua, potable 2.500 L



INFILTRACION
AGUA ESCORRENTIA

Recarga

Recarga

Recarga

DESECHO
AGUAS NEGRAS

TRATAMIENTO
AGUAS GRISES

MITIGACION
INUNDACIONES



REDUCCION
DE IRRIGACION



RECARGA AGUAS
SUBTERRANEAS



DISMINUCION
DE DEMANDA



AUTOSUFICIENCIA
HIDRICA



BENEFICIOS ESCALA CIUDAD Y CONJUNTO

BENEFICIOS A ESCALA VIVIENDA



