

Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs): Una experiencia de 3 años

Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs): Una experiencia de 3 años

2016



2016



Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias en la Región del Maule (SCALLs): Una experiencia de 3 años

Autores CTHA

Roberto Pizarro Tapia
Fernando Urbina Fuentes
Carlos Vallejos Carrera
Romina Mendoza Mendoza
Johan Guzmán Díaz
Jaime Tapia Sanhueza
Claudia Sangüesa Pool
David Campos Campos
Juan Pino Fuentes
Rodrigo Saens Navarrete
Tamara Tigero Richards

Autores U. Arizona

Pablo García Chevesich

Autores INDAP

Jairo Ibarra Gonzalez
Alejandro Abarza Martínez
Rodrigo Garrido Sanchez

Autores Delegación presidencial de recursos hídricos

Reinaldo Ruiz Valdés
Carolina Morales Calderón

Autores AENER

Cesar Avendaño Valenzuela

Editora

Maite Pizarro Granada



ISBN: 978-956-329-070-7



PRÓLOGO

Se me ha pedido como Presidenta de la Comisión de Recursos Hídricos del Senado, realizar un prólogo a este libro, el cual da cuenta de los resultados de un proyecto de investigación aplicada, referido al desarrollo y aplicación tecnológica de los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias y el cual fue llevado a cabo con financiamiento del Gobierno Regional del Maule.

Debo señalar que la petición me agradó de sobremanera por dos cosas. La primera es que es un tema apasionante y sobre el cual nuestro país debería dedicarle un mayor tiempo por la posibilidad de aumentar la oferta de agua en diversos usos y en diversos espacios, rurales y urbanos, donde las aguas lluvias ofrecen una buena posibilidad de trabajo. La segunda, es que los recursos hídricos son cada vez más demandados para su uso en Chile y eso habla de la inmensa presión a que están siendo sometidos y también de las necesidades hídricas claramente crecientes que denota nuestro país.

Este libro, que da cuenta del desarrollo del proyecto “Transferencia, Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias”, nos hace transcurrir por diversos elementos que condujeron al éxito del mismo. El primero de ellos es la historia de los sistemas de captación de aguas lluvias, lo cual nos señala que estas técnicas no son algo nuevo y han sido parte de la humanidad en un largo recorrido. Por tanto debemos agudizar el ojo y escrutar de buena manera lo que la historia nos dice, para aprovechar de mejor forma las oportunidades que se nos abren con estos sistemas. Un segundo aspecto que llama la atención es la experiencia internacional y particularmente el caso de Brasil y México, donde estos sistemas son la base para ofertar los recursos hídricos a la población, hecho altamente relevante cuando en Chile estamos gastando sumas ingentes en el abastecimiento de agua con camiones aljibes para zonas rurales. Pero, llama la atención en el libro un hecho particular; estas obras poseen un diseño hidrológico, es decir, son función de las características pluviométricas de cada zona y eso las hace ser aplicables a diversas zonas del país. Así por ejemplo, se explicita la metodología para capturar un mismo volumen de agua en una zona como Combarbalá en mi Región de Coquimbo o en otra zona tan distinta como Curanipe en la Región del Maule y eso es muy importante, porque da cuenta de las singularidades geográficas que manifiesta Chile a lo largo y también a lo ancho de su territorio. A lo expuesto, se suma un análisis económico que demuestra la fortaleza de estas obras frente a los camiones aljibes; la calidad del agua recolectada, la cual alcanza a tener niveles para consumo humano según la norma chilena; los materiales probados y tratados y las conclusiones que surgen del uso y prueba de los mismos; de las aplicaciones de la energía solar para superar la diferencia de altura cuando no se cuenta con la suficiente gravedad para el desplazamiento del agua; y es muy interesante el aporte que en la práctica han llevado a cabo instituciones como Indap y la Delegación Presidencial de Recursos Hídricos, que muestran que estos sistemas con variantes, pueden constituirse en una opción válida para los sectores rurales de Chile.

Por otra parte, estos aspectos pueden ser ampliados desde la perspectiva de generar diversos usos para las aguas lluvias rurales, los cuales van desde el doméstico y el agrícola, hasta el combate de incendios forestales, que en los últimos años han sido una lacra para Chile. De igual manera el uso de las aguas lluvias en zonas urbanas, puede tener importantes réditos si se estudian esos aspectos, sobre todo en el objetivo de aumentar la oferta de agua para las áreas verdes; disminuir los caudales circulantes en zonas urbanas, reduciendo con ello los impactos negativos sobre la infraestructura y la amenaza sobre las vidas humanas; y posibilitar la recarga de acuíferos desde las ciudades, todo lo cual es necesario investigar por las altísimas potencialidades que ello posee.

Sin embargo y dándole toda la importancia que merece a lo ya expuesto, existe un hecho muy relevante a mi modo de ver. Este hecho consiste en que una investigación científica tecnológica, financiada con aportes del Fondo de Innovación para la Competitividad de un Gobierno Regional, ha sido capaz de generar propuestas metodológicas de uso y combinación de materiales, que puede ser aplicada en diversas partes del país y eso habla de la posibilidad concreta de descentralizar a la ciencia y la tecnología, y darle una oportunidad a las regiones.

De lo anterior se desprende también un hecho muy claro; es necesario incrementar el aporte en I+D en Chile, el cual alcanza solo al 0,38% del PIB, cifra que es muy baja comparada con los países de la OCDE, pero que al analizarlo con respecto al agua baja al 0,0025%, es decir, 160 veces menos, aunque según cifras oficiales, el agua representa el 60% del PIB del país.

Finalmente deseo felicitar a quienes financiaron este proyecto visionario que le abre puertas no solo a la Región del Maule, sino que a todo Chile; a quienes lo propusieron, lo concretaron y lo desarrollaron; a los que han hecho su aporte desde otras latitudes y desde otras instituciones; y muy especialmente a los investigadores del Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, que han demostrado con su esfuerzo que la investigación puede traer beneficios concretos a la vida de las personas y especialmente, a las de aquellas más vulnerables de nuestro país.

Adriana Muñoz D'Albora
Senadora de la República
Presidenta
Comisión de Recursos Hídricos
Senado de Chile

Índice

1. Introducción	11
2. Estado del arte	11
2.1 Captación del Agua Lluvia y su Importancia	11
2.2 Historia de la Captación del Agua Lluvia	12
2.3 Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs)	13
2.4 Situación Actual de los SCALLs	15
2.5 Aplicaciones de los SCALLs	18
3. Etapas del proyecto	18
3.1 Etapa I: Diseño Hidrológico	18
3.1.1. Recopilación de información	18
3.1.2. Gira tecnológica	18
3.1.3. Selección de sitios para ensayos	19
3.1.4. Caracterización hidrológica de sitios y diseño de las obras	19
3.1.5. Instalación de pluviógrafos digitales	19
3.2 Etapa II: Diseño y Construcción	21
3.2.1. Definición, selección y combinación de materiales	21
3.2.2. Diseño teórico de SCALLs	22
3.2.3. Replanteo de terreno	22
3.2.4. Construcción de SCALLs	22
3.3 Etapa III: Calidad de Agua	22
3.3.1. Muestreo y análisis de las aguas	22
3.4 Etapa IV: Transferencia Tecnológica	23
4. Giras tecnológicas a sistemas de captación de aguas lluvias	26
4.1 Gira Técnica a México	26
4.1.1. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA	26
4.1.2. Visita a dependencias de Laboratorios de Calidad y Potabilización de Aguas	28
4.1.3. Tecnologías apropiadas en el medio rural, comunidades indígenas y zonas marginadas	29
4.2 Gira técnica a Brasil	31
4.2.1. Reunión con el Dr. Luiz Rafael Palmier, Universidad de Minas Gerais	31
4.2.2. Visita a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, EMBRAPA	32
4.2.3. Presentación Proyecto “Sistemas de Captación de Aguas Superficiales de Lluvias en Barraginhas”	33
4.2.4. Visita a terreno a Unidades de los programas P1MC y P1+2	34
4.2.5. Programa Un millón de cisternas, P1MC	35
4.2.6. Unidad demostrativa Localidad de Ignacio Felix, Municipalidad de Novas	35
4.2.7. Unidad demostrativa Municipio de Itaobim	36
4.2.8. Cisternas Utilizadas en Escuelas	36
4.2.9. Programa Una Tierra y Dos Aguas, P1+2	37
4.2.10. Unidad Demostrativa Comunidad Humaita Municipio de Itinga	38

5. Diseño y construcción de sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias, SCALLs	39
5.1. Selección de Sitios para la Construcción de las Unidades	39
5.2. Caracterización Hidrológica de los Sitios	42
5.2.1. Selección de las estaciones	42
5.2.2. Tratamientos estadísticos	42
5.2.2.1. Definición de los estadígrafos de posición	42
5.2.2.2. Definición de las Funciones de Distribución de Probabilidad	43
5.2.2.3. Ajuste a una Función de Distribución de Probabilidad	43
5.2.2.4. Pruebas de bondad del ajuste	46
5.2.2.5. Ejemplo Práctico de Cálculo	47
5.2.3. Coeficiente de escorrentía	49
5.3. Diseño Hidrológico de las Obras del Sistema de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias	50
5.3.1. Área de captación	50
5.3.2. Sistema de conducción	51
5.3.3. Cisterna de acumulación	51
5.4. Definición, Selección y Combinación de Materiales	51
5.5. Replanteo en Terreno	52
5.6. Etapas de Construcción	52
5.6.1. Construcción del área de captación	52
5.6.2. Construcción del área de acumulación	57
5.6.3. Sistema de conducción	63
5.6.4. Cierre perimetral	63
6. Diseño del sistema de bombeo fotovoltaico	64
6.1. Partes constituyentes de un sistema de riego fotovoltaico off grid	66
6.2. Sistemas fotovoltaicos para su uso en SCALLs	66
6.3. Rendimientos energéticos de las unidades.	67
6.3.1. Los Molinos – Curepto	67
6.3.2. Rapilermo Alto – Curepto	68
6.3.3. Los Guindos – Curepto	69
6.3.4. La Leonera – Licantén	70
6.3.5. El Huapi – Licantén	71
6.3.6. Los Marcos – Longaví	72
6.3.7. Loma de Vásquez- Longaví	73
6.3.8. Ramadilla – Pelluhue	74
6.3.9. Peño Alto – Pelluhue	75
6.3.10. Lagunillas – Chanco	76
6.3.11. Peralillo – Chanco	77
6.3.12. Quilhuené – Chanco	78
7. Evaluación de la calidad del agua del sistema	78
7.1. Muestreo de aguas y metodologías de análisis	79
7.2. Normativas vigentes para agua potable y de riego	84
7.3. Resultados	87

8. Evaluación Económica de los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias	87
8.1. Introducción	87
8.2. Características Técnicas	88
9. Resultados alcanzados en el proyecto	94
10. Prospectivas de los SCALLs – su aplicación en zonas urbanas	103
10.1. Introducción	103
10.2. Breve historia de los SCALLs	103
10.3. SCALLs como adaptación frente al cambio climático en Estados Unidos	104
10.4. Leyes de captura de agua de lluvia en los Estados Unidos	105
10.5. Prácticas de captación de aguas pluviales en zonas urbanas de los Estados Unidos	106
10.5.1. Captación de agua de lluvia en techos	107
10.5.2. Sistemas de captación de agua de lluvia en áreas verdes comerciales y residenciales, estacionamientos y calles	110
11. Sistemas de captación de aguas lluvias en Chile	113
11.1. Desarrollo de sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias (SCALLs), llevados a cabo por el Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP, con fines agrícolas	113
11.1.1. Desarrollo y evolución de los sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias (SCALLs) en la pequeña agricultura	114
11.1.2. Algunas consideraciones para el diseño y construcción del Scalls	119
11.1.3. Definiciones y Fórmulas relacionadas con las demandas de riego	120
11.1.4. Ejecución, proyecciones y costos asociados a los diversos tipos de SCALLs implementados	122
11.1.5. Análisis comparativo con otras materialidades a utilizar en la zona de acumulación	126
11.1.6. Conclusiones	127
11.2. Sistemas de captación de aguas lluvias como innovación en los programas de gobierno	127
11.2.1. El agua como derecho humano	128
11.2.3. Desafíos de Chile en la gestión de los recursos hídricos	128
11.2.4. Política pública para los recursos hídricos	129
11.2.5. Sistemas de Captación de Aguas Lluvias como Programa de Gobierno	129
12. Conclusiones y recomendaciones	131
13. Literatura consultada	132

1- INTRODUCCIÓN

La falta de agua se ha convertido en una de las principales limitantes del desarrollo social, ambiental y económico de la población mundial, situación que se agudiza aún más en comunidades rurales, como las que se encuentran en la Región del Maule. Ello no debería ser un problema, pues en este sector de Chile las ofertas de agua superan a las demandas, sin embargo, en el hecho, esa situación no logra verificarse, (Oferta media de agua: 1500 m³; demanda media: 500 m³ (Banco Mundial, 2011), principalmente porque las cifras que se manejan corresponden a grandes promedios nacionales o regionales. Así, estas percepciones o estimaciones no necesariamente dan cuenta de contextos locales de carencia del recurso ni tampoco de zonas en donde las demandas se han incrementado producto del desarrollo productivo alcanzado y del consiguiente mejor nivel de vida del país.

Por otra parte y según información otorgada por el *Informe País, Estado del Medio Ambiente* (2012), las precipitaciones, que corresponden al principal aporte de agua del país, poseen una distribución desigual a lo largo del territorio nacional, tanto en términos espaciales, como temporales. Asimismo, se indica que en los últimos 20 años se ha verificado una mayor concentración de las lluvias en gran parte de Chile, lo que implica la presencia de meses estivales con menor oferta de agua, aunque en su mayoría las estaciones pluviométricas del país no manifiestan tendencias crecientes o decrecientes significativas en relación a los promedios anuales de los últimos 25 años. (Valdés *et al.*, 2014)

En el contexto descrito, las demandas de agua se han incrementado entre 2 y 3 veces a nivel país y las comunidades rurales no son una excepción; asimismo, estas exigen cada vez más la existencia de ofertas permanentes y sustentables de agua, con vistas a mantener sus esquemas productivos y para satisfacer las demandas domésticas. Por otra parte, como la existencia de mano de obra en esos lugares ha disminuido drásticamente, al Estado le interesa mantener a la población rural allí y hace ingentes esfuerzos por abastecer de agua de calidad, al menos para uso doméstico, a una localidad rural atomizada y demandante del servicio. Esto ha llevado a que en Chile entre los años 2013 y 2015 se haya llegado a una cifra de gasto por concepto de camiones aljibes para el abastecimiento de áreas rurales, que alcanza a los \$90.000 millones, es decir, alrededor de 128 millones de dólares.

En este marco, surge la posibilidad de usar las aguas lluvias como una oferta de agua sustentable en el tiempo que posibilitaría su uso, inclusive en el reducido espectro que permite la legislación de aguas de Chile, ya que toda el agua que cae sobre una zona es de libre uso por el propietario. A esto se suma que la acumulación de agua en cisternas es una técnica muy antigua que sirve para almacenar y satisfacer las necesidades de varios individuos, aunque en la actualidad se encuentran definidas como parte de un sistema mucho más amplio, denominado Sistema de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs); asimismo estos sistemas pueden ser construidos en áreas de terreno empinado y en zonas remotas o de poca población, donde es menos factible desde el punto de vista físico o financiero instalar tuberías de distribución de agua. En dichas localidades, se enfrenta la obligación de realizar el abastecimiento del recurso mediante camiones aljibes, lo que genera un alto costo para los entes públicos que gestionan dicha distribución y que en este caso, corresponden a las municipalidades. Así, claramente los SCALLs se convierten en una alternativa apropiada para disminuir los costos de abastecimiento de agua, pensando por ejemplo que en la Región del Maule de Chile, el monto promedio anual de precipitación es de 1.000 mm, suponiendo un área de captación pequeña de sólo 50 m² y un aprovechamiento del 80% de las aguas lluvias, se podrían tener 40.000 litros (40 m³) de agua gratuitos cada año. Por otra parte, es importante agregar que en Chile los SCALLs aún no han sido implementados de forma masiva, en comparación con países como EEUU, España, Alemania, Sudáfrica, China, Taiwán, Singapur, Nueva Delhi, México y Brasil, entre otros, en donde estos sistemas se han masificado con proyectos que han llevado a cabo la construcción de cientos, miles y hasta millones de sistemas de acumulación de aguas lluvias.

En este marco, este proyecto liderado por la Universidad de Talca, se planteó como objetivo general el incrementar la disponibilidad de agua para zonas rurales en períodos estivales y de sequías, lo que permite la utilización del recurso con fines de consumo para agua potable, producción agropecuaria y consumo animal. Asimismo, los objetivos específicos fueron determinar el diseño óptimo de cada sistema de captación de aguas lluvias, a través de la obtención de la oferta hídrica (pluviometría anual), la disponibilidad de materiales y los costos de producción, entre otras variables, y ello para las distintas zonas rurales de las comunas de Curepto, Longaví, Chanco, Pelluhue y Licantén, de

la Región del Maule, en donde se implementó el proyecto; igualmente, fue un objetivo del mismo el determinar los tratamientos hídricos para que el agua captada tenga la calidad requerida según los usos determinados; y finalmente se propuso transferir los paquetes tecnológicos desarrollados mediante un modelo de transferencia tecnológica, que permitiese masificar efectivamente los sistemas de captación de aguas lluvias, entre los habitantes de las distintas localidades rurales de la Región del Maule y de otras regiones de impacto del proyecto.

Los principales productos a alcanzar por el proyecto son la disponibilidad de agua almacenada y tratada, apta para cubrir las necesidades previamente establecidas de los habitantes donde se instalará el SCALLs; la disminución de los costos por traslado de agua con camiones aljibes en épocas de escasez en las zonas rurales; el desarrollo de un paquete tecnológico con las medidas y recomendaciones apropiadas para el diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias para cada sitio estudiado; y la generación de un efecto de réplica del sistema en la zona rural, aumentando la capacidad y la cantidad de acumulación de agua.

El monto del proyecto alcanzó los MM\$ 359,8 los cuales fueron aportados íntegramente por el Gobierno Regional del Maule durante los 54 meses de ejecución. El proyecto tuvo como mandante al Gobierno Regional del Maule (GORE Maule), institución que establece los temas prioritarios de investigación en la Región y como contrapartes a las Ilustres Municipalidades de Curepto, Longaví, Chanco, Pelluhue y Licantén. Finalmente, las próximas líneas dan cuenta del desarrollo del proyecto, el estado del arte de los SCALLs en Chile y el mundo, los resultados alcanzados, la evaluación económica de los SCALLs y las proyecciones que poseen este tipo de obras en un país como Chile.

2.- ESTADO DEL ARTE

2.1 Captación del Agua Lluvia y su Importancia

Siendo el aumento sostenido de la población un hecho inevitable, se anticipa que el agua se convertirá en el recurso natural más importante para la humanidad, aún más importante que el petróleo (Ruskin, 2001). En muchas regiones del mundo el agua se está convirtiendo en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y la estabilidad económica y política. Aunque el 70% de la superficie del planeta está compuesto por agua, solamente un 2.5% es agua dulce, y de esta última, poco menos de un 0.3% es agua superficial. De esta manera, la falta de agua es una de las principales restricciones del desarrollo social y económico para la población mundial, situación que se agudiza aún más en las comunidades rurales. En el mundo 1,100 millones de personas carecen de instalaciones necesarias para abastecerse de agua y la mayor parte de ellas vive en zonas rurales (OMS, 2004). En el mismo sentido, Guerrero *et al.* (2009) indican que en muchas regiones del mundo el agua se está convirtiendo en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y la estabilidad económica y política. En función de lo expuesto, Cabrera (2006) señala que el ahorro del agua es una opción que siempre será más respetuosa con el medio natural que la alternativa de aumentar la oferta. Por tanto, es importante la aplicación y el uso de alternativas para el abastecimiento de agua como lo ofrecen los sistemas de captación de agua lluvia, para satisfacer la demanda de los diversos consumos humanos.

En el marco descrito, se puede agregar que la Captación de Agua Pluvial (CAP) o Captación de Agua Lluvia (CALL), es el término utilizado tradicionalmente para la recolección de agua de precipitación en países húmedos y áridos en contextos de pobreza y riqueza y sirve para el abastecimiento de agua en los hogares, la producción agrícola y el mantenimiento de espacios verdes y ecosistemas estratégicos para la vida urbana y rural (Gleason, 2005).

Por otra parte, es importante agregar que de acuerdo a lo descrito por Pacheco (2008), en la Cumbre de Desarrollo Sostenible en Johannesburgo, desde el año 2002 se inició un posicionamiento del agua lluvia en las agendas políticas nacionales e internacionales, lo cual ha permitido ir cambiando lentamente la racionalidad sobre el despilfarro del recurso pluvial y repensar el paradigma de la centralización del suministro de agua potable en zonas urbanas y rurales. Asimismo, en la XII Conferencia de IRCSA (2005) (Internacional Rainwater Catchments Systems Association) realizada en Nueva Delhi, se acordó entre un amplio grupo de expertos internacionales, que el adecuado manejo del agua de lluvia representa una opción real para mitigar los efectos de las inundaciones y de las sequías, además de disminuir las extracciones de agua de los acuíferos, lo cual contribuye a estabilizar los mantos freáticos.

También es relevante destacar que captar agua lluvia es una práctica importante porque promueve la autosuficiencia, ayuda al cuidado del recurso y al ahorro de energía que otros sistemas utilizan. Asimismo, es importante establecer relaciones efectivas con las instituciones de educación, las familias, las comunidades y las sociedades civiles locales, socios del sector privado donde se desarrollarán las capacidades de innovación tecnológica (IV Foro Mundial del Agua, México 2006). Además, se deja de manifiesto la necesidad de construir un enfoque integral para el manejo del agua y se recomienda ampliar los usos del agua pluvial en los centros urbanos. El aprovechamiento del agua lluvia no debería permanecer, como lo es hoy en día, como una actividad aislada de los programas nacionales y locales, sino que debe convertirse en una estrategia que reafirma el camino hacia la sostenibilidad urbana para la satisfacción de necesidades vitales del conjunto de la población.

Finalmente, Pacheco (2008) señala que las ventajas del uso del agua lluvia no son sólo físicas, sino también culturales y económicas. Así, la captación in situ del agua pluvial deberá ser promovida oficialmente y ser incluida en normativas urbanas, en programas educativos y de generación de ingresos de amplio alcance. Solo así empezará a tener el reconocimiento y el aval político que merece para ser considerada como un recurso estratégico para la sostenibilidad, la reducción de riesgos y la prevención de desastres.

2.2. Historia de la Captación del Agua Lluvia

Las prácticas ancestrales de uso del agua lluvia han existido a lo largo de la historia de la humanidad. Se asocian al conocimiento local del medio natural; a la periodicidad y los volúmenes de precipitación durante las estaciones de lluvia; a la evaporación y las temperaturas locales, al aprovechamiento de la topografía, al potencial de uso de las aguas superficiales y subterráneas; a la demanda de la población; y a las formas de apreciar el recurso hídrico en todas sus dimensiones económicas, culturales y sociales. (Pacheco, 2008)

Desde sus comienzos, el ser humano ha aprovechado el agua superficial como primera fuente de abastecimiento, consumo y vía de transporte; por ello, el valle de los ríos es el lugar escogido para establecer las primeras civilizaciones, en donde aprenden a domesticar los cultivos y con ello, se encuentra la primera aplicación al agua lluvia; pero no depende directamente de ella para su supervivencia debido a la presencia permanente del agua superficial. Cuando las civilizaciones crecieron demográficamente y algunos pueblos debieron ocupar zonas áridas o semiáridas del planeta, comenzó el desarrollo de formas de captación de aguas lluvias como alternativa para el riego de cultivos y el consumo doméstico.

Diferentes formas de captación de agua de lluvia se han utilizado tradicionalmente a través de la historia de las civilizaciones; pero estas tecnologías sólo se han comenzado a estudiar y publicar recientemente. Con base en la distribución de restos de estructuras de captación de agua de lluvia en el mundo y el continuo uso de estas obras en la historia, se puede concluir que las técnicas de captación de agua de lluvia cumplen un papel importante en la producción agrícola y en satisfacer las necesidades domésticas, con un uso intensivo en las regiones áridas o semiáridas del planeta (Ballén *et al.*, 2006).

En el Desierto de Negev, en Israel y Jordania, se han encontrado evidencias significativas acerca de obras de aprovechamiento de agua lluvia, lo cual deja de manifiesto su utilización a través de la historia. En estos lugares, se han descubierto sistemas de captación de agua de lluvia que datan de 4.000 años o más, los cuales consistían en el desmonte de lomeríos para aumentar la escorrentía superficial, que era entonces dirigida a predios agrícolas en las zonas más bajas. En la figura 1, se muestra como en las zonas altas de Yemen (zona de escasas lluvias), se encuentran edificaciones (templos y sitios de oración) que fueron construidas antes del año 1.000 A.C., las cuales cuentan con patios y terrazas utilizadas para captar y almacenar agua lluvia. Durante la República Romana (siglos III y IV A.C.), la ciudad de Roma en su mayoría estaba ocupada por viviendas unifamiliares denominadas “la Domus” que contaban con un espacio principal a cielo abierto (“atrio”) y en él se instalaba un estanque central para recoger el agua lluvia llamado “impluvium”; el agua lluvia entraba por un orificio en el techo llamado “compluvium”. En Loess Plateau en la provincia de Gansu en China, existían pozos y jarras para la captación de agua lluvia desde hace más de 2.000 años. En Irán se encuentran los “abarbans”, los cuales son los sistemas tradicionales locales para la captación y almacenamiento de aguas lluvias (VI Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, 2006).

En Centroamérica se conoce el caso del Imperio Maya, donde sus reyes sostenían a sus pueblos de modos prácticos, ocupándose de la construcción de obras públicas. Al sur de la ciudad Oxkutzcab (estado de Yucatán) en el pie de la montaña Puuc, en el siglo X A.C., el abastecimiento de agua para la población y el riego de los cultivos se hacía a través de una tecnología para el aprovechamiento de agua lluvia; el agua era recogida en un área de 100 a 200 m² y se almacenaba en cisternas llamadas “Chultuns”. Así, estas cisternas tenían un diámetro aproximado de 5 metros y eran excavadas en el subsuelo e impermeabilizadas con yeso. En Cerros, una ciudad y centro ceremonial que se encuentra en el actual Belice, los habitantes cavaron canales y diques de drenaje para administrar el agua de lluvia y mediante un sistema de depósitos, éstos permitían que la gente permaneciera en la zona durante la estación seca, cuando escaseaba el agua potable (año 200 d.C.). En otras zonas de las tierras bajas, como en Edzná, en Campeche, los pobladores precolombinos de esta ciudad construyeron un canal de casi 50 metros de ancho y de 1 metro de profundidad para aprovechar el agua de lluvia; este canal proporcionaba agua para beber y regar los cultivos.

Siglos después, el uso de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias decreció debido a la imposición de métodos y obras para la utilización del agua superficial y subterránea (presas, acueductos, pozos de extracción y sistemas de irrigación). En la península de Yucatán se dejó de lado el aprovechamiento de agua lluvia, debido

a la invasión española en el siglo XIV; los españoles colonizaron los territorios introduciendo otros sistemas de agricultura, animales domésticos, plantas y métodos de construcción europeos. Una situación similar sucedió en India con la colonización Inglesa, que obligó a los nativos a abandonar las metodologías tradicionales.



Figura 1. Cisterna abierta para la recolección de agua lluvia. Yemen. *Fuente: Laureano (2002).*

En el siglo XIX y XX, las ciudades de la mayoría de los países experimentan un gran crecimiento, realizando el suministro de agua a la población por medio de la acumulación de agua superficial para luego ser distribuida por una red centralizada de acueducto. En otras ocasiones se acudió a la explotación del agua subterránea. En cualquiera de los casos se elimina la posibilidad de sistemas de aprovechamiento de agua lluvia u otros sistemas alternativos. A comienzos del siglo XXI la situación es diferente; en muchas regiones semiáridas del mundo se establecieron poblaciones que se desarrollaron de manera vertiginosa, ejerciendo presión sobre las fuentes finitas de agua. En periodos secos el agua no es suficiente para el abastecimiento de dichas poblaciones, y se dan conflictos sociales por la escasez de agua y/o sus altos costos.

2.3. Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs)

Para Alfaro (2009), los sistemas de captación y aprovechamiento de aguas lluvias, como se define formalmente a los sistemas de captura de aguas lluvias (*Rainwater harvesting en inglés*), comprenden un conjunto muy amplio de prácticas tendientes a colectar la precipitación para satisfacer las demandas de abastecimiento de agua para consumo humano, producción silvoagropecuaria o el funcionamiento de sistemas naturales. Según Ballén *et al.* (2006), los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia son el resultado de las necesidades (demanda), los recursos disponibles (precipitación, dinero para invertir y materiales de construcción) y las condiciones ambientales en cada región. Además, agrega que se piensa en buscar sistemas alternativos de abastecimiento, solo cuando la red de agua potable no existe, el suministro es deficiente o cuando el agua tiene un alto costo. En el mismo contexto, las prácticas más difundidas están orientadas a satisfacer la demanda de agua para la población en zonas de escasez muy prolongada, siendo los sistemas de captación desde los techos de las viviendas el ícono de estos sistemas (Alfaro, 2009). Sin embargo, Ruskin (2001) señala que existen dos técnicas principales para la captación del agua lluvia, las cuales utilizan el mismo principio. La primera consiste en despejar una extensión grande de terreno, como la ladera de un cerro y cubrirla con un material impermeable; estos sistemas son generalmente conocidos como *sistema de captación de ladera*. Asimismo, el segundo tipo de técnica de recolección de agua de lluvia atrapa el agua sobre el techo de una casa, desde donde se desvía hacia una cisterna de acumulación. Este tipo de sistema se conoce como *sistema de captación de techo* (Figura 2).

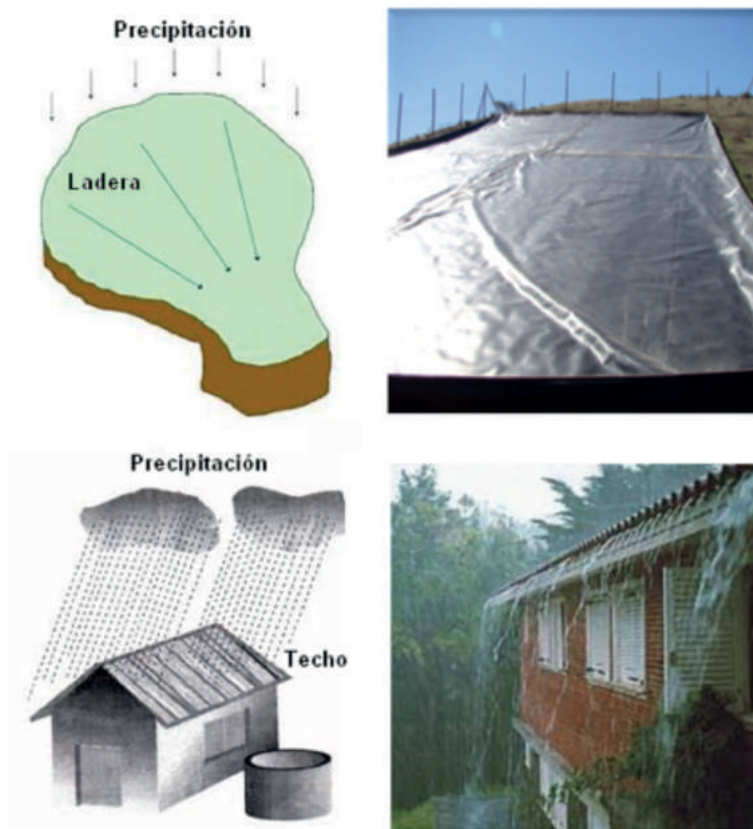


Figura 2. técnicas para la Captación de Aguas Lluvias. *Fuente: Elaboración Propia.*

Independiente del área de captación utilizada, ya sea ladera o techo, se puede mencionar que a grandes rasgos la composición general de un Sistema de Captación y Aprovechamiento de Agua Lluvia, tiene principalmente cuatro componentes, los cuales son definidos por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2003), como Captación (superficie destinada a la captación del agua lluvia para un fin beneficioso); Recolectión (conjunto de tubos o canaletas situadas en las partes bajas del área de captación cuyo objetivo es recolectar el agua lluvia y conducirla hacia el interceptor); Interceptor (dispositivo que capta las primeras aguas de lluvia correspondientes al lavado del área de captación y que pueden contener impurezas de diversos orígenes); y Almacenamiento (depósito destinado a la acumulación, conservación y abastecimiento del agua lluvia con fines domésticos o productivos).

Pero, a pesar de tener claridad acerca de los componentes de un sistema de captación, los aspectos fundamentales a la hora de diseñar y poner en marcha un proyecto de estas características, son la elección del sitio para establecer el sistema; la demanda de agua de la población; la disponibilidad de agua (pluviometría media anual para una serie de registro mayor o igual a diez años); la determinación del área efectiva de captación del agua lluvia; la determinación del sistema de conducción del agua captada; del bombeo del agua almacenada; y del sistema de tratamiento del agua de lluvia (Laureano. 2002). Asimismo, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2007) plantea que los cuatro factores importantes para el diseño de sistemas de captación de agua lluvia, son la precipitación pluvial (cantidad frecuencia y distribución), el área de captación, la capacidad de almacenamiento y la demanda de agua.

Por su parte, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente de Perú (2003), señala en su publicación “Captación de Agua Lluvia para consumo humano”, que la aplicación de estos sistemas está recomendada sólo para zonas rurales o urbanas marginales con niveles de precipitación pluviométrica que hagan posible el adecuado abastecimiento de agua de la población beneficiada. Asimismo, dentro de los requisitos previos al desarrollo de la obra, indica que el diseño para fines de abastecimiento de agua, debe estar basado en los datos de precipitación mensual de por lo menos diez (10) años, obteniendo así el promedio mensual y/o anual de las

precipitaciones. En el mismo sentido, la demanda de agua debe considerar un mínimo de cuatro (4) litros de agua por persona/día, para ser destinada solamente a la bebida, preparación de alimentos e higiene bucal.

2.4. Situación Actual de los SCALLs

Diversas formas de captación de agua de lluvia se han utilizado tradicionalmente a través de los siglos. En la actualidad, la implementación y aplicación de Sistemas de Captación de Agua Lluvia es una temática que ha sido abordada en muchos lugares del mundo. Pero esta tecnología se ha comenzado a estudiar y publicar técnica y científicamente, sólo en épocas recientes. A continuación se presenta una reseña de la situación actual de los SCALLs, presentada por Ballén *et al.* (2006).

a) África

La problemática del abastecimiento de agua potable es de carácter global, pero es una situación muy crítica en el continente africano debido a la alta concentración de pobreza que imposibilita la obtención de la cantidad de recursos y la tecnología necesaria para la construcción y operación de un sistema de acueducto y alcantarillado adecuado; además, la escasez de fuentes apropiadas en cuanto a calidad y seguridad del suministro, ha hecho de éste un problema aún mayor. A pesar de que en algunas zonas de África en los últimos años se ha producido una rápida expansión de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, el proceso de implantación de esta tecnología en el Sur de África ha sido lento. Esto debido a la baja precipitación, el reducido número y tamaño de las cubiertas impermeabilizadas y el alto costo en la construcción de los sistemas, en relación a los ingresos familiares. La falta de disponibilidad de cemento y arena, eleva el precio de las instalaciones. Sin embargo, la recolección de agua lluvia es muy difundida en África, con grandes proyectos en Botswana, Togo, Mali, Malawi, Sudáfrica, Namibia, Zimbabue, Mozambique, Sierra Leona y Tanzania. Así, uno de los proyectos adelantados es el de “Sistemas de Aprovechamiento de Agua Lluvia de Muy Bajo Costo”, el cual se desarrolló con el concurso de varias organizaciones Africanas y el apoyo de la Development Technology Unit de Inglaterra. Las prácticas convencionales de aprovechamiento de agua lluvia, en muchos países de África son de carácter informal, lo que permite tener costos reducidos, pero una muy baja calidad del agua y una eficiencia del sistema muy baja. Los sistemas formales son promovidos por agencias subsidiarias o adoptadas por familias de clase media (con grandes volúmenes de almacenamiento) que intentan satisfacer la demanda total de la casa. En un punto intermedio se encuentran las tecnologías de “muy bajo costo”, con las cuales se pretende suplir sólo un porcentaje de la demanda total de las casas a partir de una inversión que no supera los 120 dólares y utilizando los materiales disponibles en la zona.

b) Asia

La India es el segundo país con mayor población después de China. Por ello el gran problema que enfrenta el gobierno es suministrar los servicios básicos a 1.000 millones de personas. La solución que se ha tomado para enfrentar estos problemas son las técnicas de aprovechamiento de agua lluvia. En la India, el monzón es un diluvio breve; allí se dan aproximadamente 100 horas de lluvia por año. En estas 100 horas se debe captar y almacenar el agua para las otras 8,660 horas que constituyen un año. En Bangladesh, la recolección de agua lluvia se ve como una alternativa viable para el suministro de agua segura en áreas afectadas por contaminación con arsénico. Desde 1977, cerca de 1.000 sistemas de aprovechamiento de agua lluvia fueron instalados en el país por la ONG Forum for Drinking Water Supply & Sanitation. También se puede agregar que en Bangladesh existen varios tipos de tanques utilizados para el almacenamiento de agua lluvia, entre ellos, los tanques de concreto reforzado, los tanques de mampostería, las cisternas y los tanques subterráneos; éstos tienen un costo que varía entre US\$ 50 y US\$ 150. Así, el agua lluvia almacenada se usa para beber y cocinar; además se encuentra aceptada como segura y cada vez es más utilizada por los usuarios locales. En el marco descrito, cabe mencionar que desde 1988 se han probado eficientes técnicas de captación de agua lluvia y de 1995 a 1996, el gobierno local ha implementado el proyecto llamado “121” para captación de agua lluvia, apoyando económicamente a cada familia para construir un campo de recolección de agua, dos almacenamientos y un terreno adecuado para cultivar, lo que permite suministrar agua a 1.2 millones de personas (260.000 familias) y 1.18 millones de cabezas de ganado. Por otra parte, Singapur cuenta con recursos naturales limitados y una creciente demanda de agua; esto ha llevado a la búsqueda de fuentes alternativas y métodos innovadores para el aprovechamiento del recurso agua. Alrededor del 86% de la población de Singapur vive en

edificios de apartamentos. Los techos de estos edificios son utilizados para la captación de aguas lluvias. El agua lluvia es almacenada en cisternas separadas del agua potable, para darle usos diferentes al de consumo humano. En Tokio el aprovechamiento de agua lluvia es promovido para mitigar la escasez de agua, controlar las inundaciones y asegurar agua para los estados de emergencia. En Tailandia, el almacenamiento de agua lluvia proviene del escurrimiento de los techos en vasijas de arcilla y corresponde a un diseño apropiado y económico para obtener agua de alta calidad. Las vasijas se consiguen para diferentes volúmenes, desde 1.000 hasta 3.000 litros y están equipadas con tapa, grifo y un dispositivo de drenaje. El tamaño más popular es 2.000 litros; esta vasija tiene un costo de U\$ 20 y puede suministrar agua lluvia suficiente para una casa con seis personas durante el período seco.

c) Sudamérica

En la década pasada en Brasil, muchas ONG y organizaciones ambientales se enfocaron en trabajar en el suministro de agua para consumo humano, usando sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. En la región noroeste de Brasil, de clima semiárido, el promedio anual de lluvia varía desde 200 hasta 1.000 mm. Las comunidades nativas tradicionalmente han recogido agua lluvia en pozos excavados a mano en rocas, pero este sistema no logra satisfacer las necesidades de la población; por ello una ONG y el gobierno de Brasil iniciaron un proyecto para construir un millón de cisternas para la recolección de agua lluvia, en un periodo de 5 años, y así beneficiar a 5 millones de personas. La mayoría de estos tanques fueron hechos con estructuras de concreto prefabricado o concreto reforzado con mallas de alambre.

d) Centro América

El proyecto “Agua y Vida” desarrollado en San Felipe (Estado de Guanajuato, Mexico), comenzó en 1996 con el almacenamiento de agua, debido a que en esta población se dan períodos sin lluvia que superan los dos meses. De esta manera, el primer desarrollo tecnológico fue un sistema de aprovechamiento de agua lluvia que cuenta con una cisterna con capacidad de almacenamiento de 500.000 litros y un área de captación cubierta de piedra laja. La siguiente obra fue construida en las afueras del municipio y fue llamada “Techo-Cuenca”, con capacidad para almacenar 285.000 litros de agua, con lo cual se ha denominado “Casa del Agua y Vida”, donde se distribuye agua potable a las familias que la necesitan. Varias de las construcciones de tipo institucional como el jardín de niños y la escuela municipal, están equipadas con sistemas de aprovechamiento de agua lluvia que es utilizada para la descarga de inodoros, el aseo de pisos y baños y para regar los jardines. En seis años la población ha sido transformada y la mayoría de sus necesidades de agua han sido suplidas por los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia.

En los barrios Israel Norte y Villa Nueva de Tegucigalpa, Honduras, se pueden encontrar viviendas acondicionadas con precarios sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, incluso faltos de mantenimiento y limpieza. Sin embargo, a pesar de sus deficiencias, estos sistemas logran mejorar la calidad de vida de los habitantes que ponen en práctica las metodologías para aprovechar el agua lluvia. Muchos de estos sistemas utilizan materiales reciclables y algunos prototipos muestran grandes niveles de iniciativa e ingenio.

e) Norte América

Los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia son usados en los siguientes 15 Estados y territorios de los Estados Unidos: Alaska, Hawai, Washington, Oregon, Arizona, Nuevo México, Texas, Kentucky, Ohio, Pennsylvania, Tennessee, North Carolina, Virginia, West Virginia y las Islas Vírgenes. Se estima que más de medio millón de personas en los Estados Unidos utilizan sistemas de aprovechamiento de agua lluvia, abasteciéndose de agua para usos doméstico o propósitos agrícolas, comerciales o industriales. Además, existen más de 50 compañías especializadas en el diseño y construcción de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias. En el mismo sentido, se puede agregar que Texas es el estado donde más se utilizan los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Una casa típica en Texas tiene un área de 200 m² de cubierta y puede producir más de 150.000 litros de agua al año, con una precipitación anual media de 850 mm. El costo de los sistemas depende básicamente del tamaño de la cisterna de almacenamiento; así, el sistema para una casa puede costar entre US\$5.000 y US\$8.000 (precio de referencia correspondiente al año 2000), incluyendo los canales y tuberías para conducir el agua a la cisterna, el costo de la cisterna, la bomba y el sistema de tratamiento. En Vancouver, Canadá, se provee de un subsidio para la compra de barriles para el aprovechamiento

del agua lluvia, como parte de un programa piloto para la conservación del agua. Los barriles de agua lluvia son tanques plásticos de 75 galones (284 litros) que se entregan por U\$ 40 incluidos los impuestos. El barril se utiliza para recolectar agua lluvia proveniente de los techos, siendo utilizada para regar los jardines y el césped; estas actividades demandan más del 40% del agua total que llega a las viviendas durante el verano. Las proyecciones indican que cada barril podría ahorrar cerca de 1.300 galones (4.920 litros) de agua durante los meses de verano, donde la demanda de agua es más alta.

f) Europa

En 1998 fueron introducidos los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia en Berlín, Alemania, como parte de un redesarrollo urbano a gran escala, (Daimler Chrysler Potsdamer Platz), con el fin de controlar las inundaciones, utilizar racionalmente el agua de la ciudad y crear un mejor microclima. El agua lluvia cae en las cubiertas de 19 edificios (32.000 m²), se recoge y almacena en un tanque subterráneo de 3500 m³. Esta agua es usada para la descarga de inodoros, el riego de zonas verdes (incluyendo techos verdes) y para llenar un estanque artificial.

En otro proyecto Belss-Luedecke-Strasse Building State en Berlín, el agua lluvia de todas las cubiertas (7.000 m²) es descargada a una cisterna con capacidad de 160 m³, junto con el agua de escurrimiento de las calles, espacios de parqueadero y vías peatonales (área de 4.200 m²). El agua es tratada en varios pasos y usada en la descarga de sanitarios y el riego de jardines. El sistema está diseñado para que la mayoría de los contaminantes del flujo inicial sean evacuados al alcantarillado de aguas lluvias. El sistema retiene aproximadamente el 58% del agua lluvia que cae dentro del perímetro de las instalaciones. A través de un modelo basado en 10 años de simulación, se estimó que el ahorro de agua potable con la utilización de agua lluvia es de 2.430 m³ por año; con este volumen se puede preservar el reservorio de agua subterránea de Berlín.

g) Oceanía

A excepción de las grandes urbes y las poblaciones mayores, la densidad de población en Australia es muy baja; debido a esto el agua debe recorrer grandes distancias a través de kilómetros de tubería, haciendo que ésta sea muy costosa o que en algunos lugares remotos no se suministre el servicio. De esta forma, se ha utilizado el aprovechamiento de agua lluvia como una solución muy común al problema de suministro de agua. En 1994, el Australian Bureau of Statistics (Oficina Australiana de Estadística) realizó un estudio mostrando que el 30.4 % de los hogares australianos ubicados en las zonas rurales y el 6.5% de los hogares en las ciudades, utilizan algún sistema de aprovechamiento de agua lluvia; también se indica en el estudio que el 13 % de las casas donde se ha implementado un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, el agua se utiliza para beber y cocinar.

h) Chile

Debido a la “estable” oferta hídrica que posee Chile, los sistemas de captación de aguas lluvias aún no se han masificado y no existen evidencias documentadas respecto al tema, salvo autores como Pizarro *et al.*, quienes diseñaron y construyeron una cisterna de acumulación de aguas lluvias para uso doméstico en una localidad llamada Romeralsillo, perteneciente a la comuna de Ovalle en la Región de Coquimbo. Esto fue desarrollado como una unidad demostrativa dentro de las actividades del proyecto Innova-Corfo Regional (05CR11FT-15) ejecutado durante los años 2006 a 2009. En el mismo sentido, cabe señalar que el sistema diseñado consideró un área de captación de 308 m² y un estanque de acumulación de 21 m³ para un promedio anual de precipitaciones que, según el estudio de León (2006) realizado en esta región, es de alrededor de los 179,1 mm/año. Así, se ha logrado captar agua para uso doméstico y de esta manera, se ha finalizado con éxito la primera experiencia documentada sobre sistemas de captación de agua lluvia en Chile. Sin embargo, es de suma importancia masificar estos sistemas en el territorio nacional con el fin de fomentar el uso sustentable del recurso hídrico. En la actualidad, es decir al año 2016, existen diversas iniciativas a nivel país, alguna de ellas que se han derivado de la misma experiencia generada por este proyecto y otras que han surgido de la experiencia que en estas materias ha desarrollado el Instituto de Investigaciones Agropecuarias. En general se aprecia un alto interés por utilizar las aguas lluvias como un incremento a la oferta de agua y ello tanto en zonas áridas y semiáridas (Regiones de Coquimbo y Valparaíso) como en zonas húmedas (Regiones de Los Ríos y Los Lagos).

2.5. Aplicaciones de los SCALLs

Las aguas que son almacenadas por los SCALLs, sirven para la utilización de diversos usos (doméstico, productivo, humano y animal, entre otros, lo cual puede favorecer el desarrollo económico y social de distintos sectores. Así, dentro de las actividades que más se han desarrollado mediante la implementación de los SCALLs, se encuentran los usos para el *Consumo Humano*, el *Uso Doméstico* y el *Uso Productivo*. Cabe señalar que estas distintas utilidades, requieren distintos niveles de calidad para el agua almacenada, siendo las aguas para consumo humano, las que requieren un mayor estándar de calidad, norma que se encuentra definida en Chile por la NCh409/1. of 2005. Por otra parte, si se piensa en el uso doméstico de las aguas almacenadas —por ejemplo, en el llenado de estanques de baños, riego de jardines, entre otras actividades—, los niveles de calidad necesarios son menores respecto de los requeridos para el consumo humano. Asimismo, y si el volumen de agua almacenada así lo permite, puede ser viable el desarrollo de cultivos agrícolas, los cuales requieren una calidad de agua inferior a la de consumo humano, pero mayor a la de uso doméstico. En este sentido, la calidad del agua necesaria para los usos mencionados se encuentra definida por la NCh 1.333 Of. 78 Modif. 87, más otros parámetros adicionales de tipo biológico y contaminante. De todas maneras, sea cual sea la utilización que se le dé al agua almacenada, se deben cumplir los requisitos de calidad acorde a las normativas vigentes. Respecto de lo anteriormente expuesto, se puede agregar que claramente los SCALLs tienen diversas aplicaciones, con lo cual son una herramienta muy poderosa a la hora de potenciar el desarrollo social y económico de sus usuarios.

3.- ETAPAS DEL PROYECTO

El proyecto Transferencia, Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias se dividió en 4 etapas, las que se enumeran a continuación: Etapa 1: Diseño Hidrológico; Etapa 2: Diseño y Construcción; Etapa 3: Calidad de Agua y Etapa 4: Transferencia tecnológica.

3.1. Etapa I: Diseño Hidrológico

3.1.1. Recopilación de información: en esta etapa se recopiló toda la información pluviométrica disponible de la región del Maule para realizar los diseños hidrológicos de las unidades. Dicha información corresponde a la registrada por la Dirección General de Aguas.

3.1.2. Gira tecnológica: para conocer más de cerca las tecnologías que se están desarrollando en torno a la captación de aguas lluvias y su uso para el consumo humano, se realizaron dos giras tecnológicas, una a México y la segunda de ellas a Brasil.

Así, en México se visitó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el que corresponde a un organismo público descentralizado que se aboca a enfrentar retos nacionales y regionales asociados al manejo del agua y a la creación de nuevos enfoques en materia de investigación y desarrollo tecnológicos para proteger el recurso y asignarlo de manera eficiente y equitativa entre los distintos usuarios. El otro lugar visitado fue el Colegio de Postgraduados, que cuenta con diferentes unidades demostrativas y metodologías asociadas a los sistemas de acumulación de aguas lluvias con fines de uso agrícola y consumo de agua potable en comunidades rurales del estado de Morelos y Michoacán, lugares en que se concentró la Gira.

Por otro lado, la gira a Brasil contempló la visita a la Universidad de Minas Gerais Campus Pampulha, Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Hidráulica y Recursos Hídricos, en donde se pudo conocer por parte del Investigador y Académico Dr. Luis Rafael Palmier, los alcances de los programas orientados a la construcción de las cisternas de acumulación de aguas lluvias presentes en Brasil: el Programa de 1 millón de Cisternas, “P1MC” y el programa de 1 tierra y 2 aguas, “P1+2”. Asimismo, se realizaron algunas visitas en el Estado de Minas Gerais, de manera de conocer in situ el desarrollo de cada una de las unidades en torno a ambos programas. Finalmente, la gira consideró algunas reuniones con la Agencia del Agua y la empresa Embrapa, con la finalidad de conocer la gestión y manejo de los recursos hídricos a nivel de cuencas que existe en el ámbito privado y público.

3.1.3. Selección de sitios para ensayos: los sitios se concentraron en sectores pertenecientes a las comunas de Curepto, Longaví, Chanco, Pelluhue y Licantén, en donde existen problemas asociados a la escasez de agua especialmente en la época estival. Para ello, se efectuaron reuniones tanto con los Alcaldes y en algunos casos con los representantes de los municipios involucrados y del Gobierno Regional para dar a conocer los objetivos y alcances del proyecto como también en conjunto, definir los sectores a priorizar en la selección de los sitios donde se emplazarán las Unidades demostrativas.

Cabe resaltar que el primer criterio fue centrarse en el Grupo Objetivo a priorizar, establecerse en las 5 comunas y focalizar las unidades demostrativas en aquellas familias que participan activamente en el programa Prodesal, programa financiado por el Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP y sobre todo en aquellos sectores en donde el Municipio hace un esfuerzo económico y humano en la distribución del recurso agua con camión aljibe.

Dentro del equipo de profesionales que participaron activamente en el desarrollo de esta investigación se definieron algunos criterios de selección de los sitios a priorizar, se cuentan:

- Tipo de tenencia, priorizando en aquellos sitios en donde exista tenencia total del predio.
- Disposición, responsabilidad y compromiso.
- Accesibilidad.
- Necesidad y disponibilidad hídrica.
- Factibilidad Técnica y espacial para establecer para la construcción de la obra.
- Impacto potencial a producir.

Respecto de los criterios definidos se asignó una ponderación de 1 a 3, siendo la escala 1 la de mayor cumplimiento.

3.1.4. Caracterización hidrológica de sitios y diseño de las obras: para realizar la caracterización hidrológica de los sitios se utilizó toda la información pluviométrica disponible hasta el año 2011, para así asegurar un buen ajuste de los datos para las estaciones seleccionadas, de tal forma de caracterizar hidrológicamente en términos de las ofertas de agua en períodos mensuales y anuales y así definir una precipitación de diseño en términos de la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones a través de funciones de distribución de probabilidad. Los datos fueron ajustados con probabilidad de excedencia de 9 años, es decir, la precipitación de diseño deberá ser superada en al menos 9 de 10 años, con lo cual se asegura que en esetiempo se contará con el agua disponible definida en el diseño. El detalle de la forma de cálculo se detalla en el capítulo 5 en mayor detalle.

3.1.5. Instalación de pluviógrafos digitales: en cada uno de los sitios seleccionados, se instalaron las mini - estaciones meteorológicas marca HOBO con 4 canales con el fin de determinar la eficiencia hidrológica del sistema. Esta mini - estación está compuesta del siguiente equipamiento:

- 1 Sensor para precipitación código S-RGB-M002. Sensor Smart.
- 1 Sensor para temperatura y humedad relativa código S-THB-M002, N° 10193983.
- 1 Trípode de 2 metros, código N° M-TPB.
- 1 Registrador de datos de 4 canales código N° H21-002 con base de montaje M-MKA.
- 1 Protector de radiación solar para sensor de temperatura y humedad relativa código RSE S/N.

Respecto del equipamiento mismo, se firmó en cada uno de los sitios seleccionados una carta de compromiso del buen uso del equipo, esta carta la firmó cada uno de los beneficiarios que participan en forma directa en este proyecto.

En cada una de las visitas junto con colocar la mini-estación meteorológica se efectuó a cada uno de los beneficiarios una breve inducción del propósito de instalar este instrumental de medición como también el funcionamiento y las consideraciones que se deben tener en su mantención.

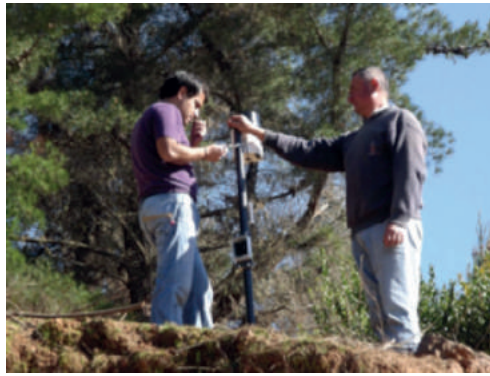


Figura 3: instalación Mini-estación sector Los Molinos, Curepto.



Figura 4: instalación Mini-estación sector Los Guindos, Curepto.



Figura 5: instalación Mini-estación sector Loma de Vásquez, Longaví.



Figura 6: instalación Mini-estación sector Peuño Alto, Pelluhue.

3.2. Etapa II: Diseño y Construcción

3.2.1. Definición, selección y combinación de materiales: en esta etapa, se procedió a la búsqueda, elección y combinación, de los materiales a ser utilizados en los distintos sitios en la construcción de las cisternas experimentales. El fin de esta etapa fue encontrar los materiales idóneos para la construcción desde el punto de vista de su calidad y los costos asociados para asegurar una calidad de agua mínima para los usos que se pretenden. Para ello se utilizó como referencia información en internet sobre distintos tipos de construcción de scalls, como también las distintas aplicaciones que tiene este tipo de reservorio de agua. Se solicitó además a distintos proveedores cotizaciones relacionadas a cada uno de los materiales analizados.



Figura 7: estanque flexible o Flexitank.



Figura 8: estanque de polietileno.



Figura 9: área de captación de geomembrana.

3.2.2. Diseño teórico de SCALLs: esta fase metodológica se planteó en el objetivo de definir los diseños que se consideran adecuados en términos de forma, materiales y contexto biogeofísico en el cual se emplazará la obra. Así, se definieron las áreas de captación, el tipo de materiales a utilizar y sus variantes; las dimensiones del depósito; los coeficientes de escorrentía a utilizar y en general todo el detalle de ingeniería que determine de la forma más precisa posible la dimensiones y costos de cada unidad involucrada. Para ello junto con analizar los costos asociados a cada uno de los materiales se efectuaron reuniones con el equipo de trabajo para unificar criterios respecto del diseño mismo de las obras.

3.2.3. Replanteo de terreno: una vez determinados los aspectos de ingeniería del detalle de las obras, se realizó un trabajo de replanteo de las obras en terreno, con el objetivo de asegurar una correcta construcción de las mismas y verificar si los detalles de construcción se enmarcan en los aspectos específicos que el terreno presenta. Si esto no se hubiese cumplido, habría que establecer correcciones de diseño con el fin de asegurar la congruencia entre el diseño y las características específicas del sitio en donde tomarán lugar las obras.

3.2.4. Construcción de SCALLs

Esta etapa contempló una serie de actividades, las que se nombran a continuación. En el capítulo 5 se desarrollan cada uno de los siguientes temas en extenso.

- i). Limpieza, trazado, movimiento de tierra y nivelado.
- ii). Estructura de soporte del área de captación.
- iii). Compactado.
- iv). Construcción área de captación con geomembrana HDPE negra de 1mm: corte, fusionado, instalado y sellado de la Geomembrana.
- v). Construcción del área de captación de hormigón
- vi). Construcción del área de acumulación.
- vii). Diseño del sistema de bombeo con paneles fotovoltaicos. En esta fase se construyeron los sistemas de distribución de agua para consumo humano, doméstico y/o productivo. Para ello, se adquirieron bombas especiales de gran potencia capaces no sólo de distribuir el Recurso hídrico acumulado sino también de poder generar una distribución que integre a toda la oferta hídrica de ese sitio.

3.3. Etapa III: Calidad de Agua

3.3.1. Muestreo y análisis de las aguas: producto de que la captación de aguas lluvias se planteó como un método para coleccionar el agua caída durante la temporada de lluvias y que su uso se realiza al menos dos a tres meses después de la fecha de captación, es recomendable tener en cuenta que siempre se deben hacer exámenes de la calidad del agua coleccionada y de su evolución en el tiempo. Esto para asegurar a la población el uso óptimo del recurso. Por ende, se recomendó realizar diagnósticos periódicos de la calidad del agua en base a la norma chilena para la calidad de agua potable (NCH 409) y la de agua de riego (NCH 1333), según sea el uso del agua almacenada. Estas normativas tienen la propiedad de indicar la calidad del recurso hídrico en base a la medición de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que indican ambas normas y sirven para determinar si dichas aguas están aptas para su uso como agua potable o de riego. El estudio considera analizar muestras de aguas en distintas épocas del año, para determinar si se generan variaciones significativas en los valores de los distintos parámetros que considera cada una de las normas.

En este contexto, se deben analizar los parámetros fisicoquímicos que incluye la NCH 409 y la norma NCH 1.333. Los valores obtenidos se deben comparar con los límites máximos permitidos en cada una de las normas.

Para el muestreo del cuerpo acuático se siguió lo establecido en el Instructivo de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas. Los procedimientos están contenidos en la Norma NCH. 411/6. Of.96 correspondiente a la “Guía para el muestreo de ríos y cursos de agua” (INN-Chile, 1999 d). Con respecto a las técnicas de muestreo, se considera la norma NCH 411/2. Of.96 correspondiente a la “Guía sobre técnicas de muestreo”. Para la preparación de recipientes, identificación, llenado, preservación y transporte

de las muestras, se siguen las técnicas señaladas en la norma NCH 411/3.Of.96 correspondientes a la “Guía sobre preservación y manejo de las muestras”.

Considerando que los muestreos se realizaron en distintos tipos de cisternas que se distinguen por su diseño y tipo de construcción característico, se debió proceder a coleccionar una muestra representativa en cada cisterna. Para la extracción de muestras, se abrió la llave de salida y se dejó correr como mínimo un minuto antes de tomar la muestra definitiva. Para las cisternas que no disponían de una llave de salida, las muestras se debieron extraer hasta una profundidad que varió entre 50 a 80 cm.

La extracción de muestras de 4 litros se debió realizar en envases de polietileno y de vidrio. Los envases de polietileno fueron lavados con una solución de detergente y luego con ácido clorhídrico concentrado de pureza técnica. Luego fueron enjuagados con agua corriente y tres veces con agua bidestilada. Los envases de vidrio fueron lavados con detergente y luego con mezcla sulfocrómica. Posteriormente, se enjuagaron con suficiente agua corriente y tres veces con agua bidestilada.

Para la extracción de las muestras, se llenó el envase previamente con la muestra y se sometió a enjuague con ella durante tres veces, de manera que el envase quedó con ambiente de muestra. Finalmente, se extrajo la muestra definitiva que fue al laboratorio, para sus respectivos análisis.

3.4. Etapa IV: Transferencia Tecnológica: el proyecto contempló una serie de actividades de transferencia, tales como la realización de cursos orientados a fortalecer las capacidades de los funcionarios de las instituciones involucradas al proyecto de investigación en temáticas referente al diseño hidrológico aplicado a los sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias. Es así como el proyecto contempló la realización de cursos durante toda la extensión del proyecto.

En cuanto al desarrollo de los cursos, éstos se realizaron en diferentes localidades dentro de la región convocándose profesionales del Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP y profesionales de los equipos técnicos del Programa Prodesal tanto de los Municipios focalizados en el proyecto como también de aquellos Municipios en donde se desarrolla el programa y que atienden sectores tanto del secano y precordillera.

Otra de las actividades realizadas fueron los días de campo, en donde se convocaron a actores públicos y privados del país y del extranjero, de manera de mostrar los resultados finales de la construcción de los SCALLS.

Finalmente, en el proyecto se realizaron dos seminarios internacionales para dar a conocer los resultados del proyecto y para mostrar nuevas tecnologías en la captación de aguas lluvias.



Figura 10: vista general curso de capacitación, Curepto.



Figura 11: vista general curso de capacitación, Chanco.



Figura 12: vista general día de campo, sector Ramadilla, Pelluhue.



Figura 13: vista general día de campo, Curepto.



Figura 14: expositores y autoridades primer seminario.



Figura 15: vista general charla internacional, Duao.



Figura 16: expositores seminario final proyecto.

4 – GIRAS TECNOLÓGICAS A SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS

Dentro de las actividades desarrolladas en el proyecto, se contemplaron dos giras tecnológicas de 5 días cada una a México y Brasil, para conocer en terreno lo que estos países están desarrollando en términos de captación y acumulación de aguas lluvias. Dichas giras fueron financiadas por el Gobierno Regional del Maule.

4.1. Gira Técnica a México

La gira se llevó a cabo entre los días 04 al 08 de Noviembre de 2013 y en donde se consideró la visita al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Este es un organismo público descentralizado que se aboca a enfrentar los retos nacionales y regionales asociados con el manejo del agua, y a permitir nuevos enfoques en materia de investigación y desarrollo tecnológico para proteger los recursos hídricos y asignarlos de manera eficiente y equitativa entre los distintos usuarios. Las dependencias del IMTA se encuentran en Jiutepec, Estado de Morelos, México.

También se visitó el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo ubicado en el Estado de México. En esta visita se conocieron diferentes metodologías y unidades demostrativas en torno a los sistemas de acumulación de aguas lluvias y su utilización para uso agrícola y consumo de agua potable en comunidades rurales del Estado de Morelos y Michoacán.

4.1.1. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA

La reunión consistió en la exposición de los investigadores y Maestros del Instituto, actividad que estuvo liderada por el Maestro Víctor Bourguette, Actual Director General del IMTA.

El Maestro Bourguett es Ingeniero Civil egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México y Maestro en Ingeniería Hidráulica con una amplia experiencia en el sector agua. Se ha desempeñado como Coordinador de Desarrollo Profesional e Institucional entre los años 2010 al 2012; como Subcoordinador de Hidráulica Urbana (2002-2010) y como Subcoordinador de Obras y Equipos Hidráulicos (2001-2002) del propio Instituto. En su trayectoria profesional ha sido colaborador de la Comisión Federal de Electricidad y del Instituto de Ingeniería de la UNAM, entre otros.

También se ha desempeñado como Profesor de la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM desde 1985 a la fecha y ha sido Profesor Visitante de Maestría en Ciencias del Agua de la Universidad de Guanajuato (1999 a 2005), de la Universidad Politécnica de Valencia, España y de la Universidad de Zacatecas.

En esta visita, se pudo conocer a través de 2 presentaciones las metodologías que el Departamento de Potabilización, Captación y tratamiento de agua lluvia, está desarrollando en distintas comunidades rurales del Estado de Morelos y Guanajuato.

a) Exposición Dra. Sofía Garrido Hoyos

La Dra. Garrido dio a conocer las iniciativas desarrolladas a nivel comunitario y familiar desarrolladas por el IMTA en el estado de Guanajuato y Morelos. También mostró algunas cifras en cuanto a la cantidad de agua lluvia caída, la extensión territorial, población y distribución de agua potable en México.

b) Exposición del Maestro, Arturo González Herrera

Su exposición estuvo referida a la Planta Potabilizadora demostrativa Unifamiliar o comunitaria del Estado de Guanajuato. Indicó que las comunidades rurales se abastecen de agua superficial a través de ríos o presas, los cuales carecen de sistemas de tratamiento de agua. El especialista menciona que se utilizó las tecnologías FIMES la cual contempla los siguientes pasos.

- Elaborar un diagnóstico técnico – social.

- Comentar con la comunidad el diagnóstico e implementar el proyecto.
- Integrar el comité de agua y formular las reglas de operación del sistema.
- Establecer un programa socioeducativo.
- Gestionar la adquisición del terreno para la construcción de la planta.
- Realizar el diseño ejecutivo de la planta potabilizadora demostrativa FIME.
- Fabricar la planta potabilizadora.
- Poner en marcha la planta y realizar talleres de capacitación para operación y mantenimiento.

Menciona además, que estas iniciativas surgen en función de la necesidad de contar con una tecnología adecuada para potabilizar las aguas de fuentes superficiales de pequeñas comunidades en Guanajuato. Por ello se adaptó, diseñó y construyó una planta piloto a escala real de filtración en múltiples etapas (FIME) en la localidad rural Mineral de Peregrina. Este proyecto tuvo como objetivo demostrar que este tipo de tecnología es adecuado para la apropiación social de la comunidad y funciona eficientemente. La potabilizadora es de operación sencilla, no requiere electricidad y es de bajo mantenimiento. Cuenta con un filtro grueso dinámico, dos filtros gruesos ascendentes en serie y un filtro lento de arena; además se clora el agua a la salida de la planta, para conservar la calidad bacteriológica en la red.

Hombres y mujeres de la comunidad fueron capacitados durante la etapa de puesta en marcha de la planta y es importante señalar que la comunidad participa organizadamente en la administración, operación y mantenimiento del sistema de agua completo: bombeo, planta potabilizadora y red de distribución de agua.

La planta FIME funciona adecuadamente cumpliendo con la modificación a la NOM-127-SSA1-1994. Entre los resultados de la encuesta aplicada a usuarios destaca que para el 96% la calidad es satisfactoria (agua clara, más limpia, sin olor); para el 88% la cantidad es aceptable; sólo el 16.3% de los usuarios son morosos y el 85% recomendaría a otras comunidades la implementación de una potabilizadora FIME con autogestión.

Después de un año de funcionamiento, la implementación de la planta potabilizadora FIME ha tenido los siguientes impactos: 1) mejor valoración del agua, que se manifiesta porque hay ahorro en el consumo de agua y distribución más equitativa entre los usuarios; 2) bienestar y confort: agua más limpia para bañarse y lavar su ropa, 3) comodidad: ahorro de tiempo y esfuerzo al reducir acarreo de agua de otra fuente, 4) cumplimiento en el pago de tarifas de agua y 5) fortalecimiento de su capacidad de organización y participación comunitaria.

En la región denominada Altos de Morelos, se encuentran entre otros municipios Huitzilac, Tepoztlán, Tlalnepantla, Totolapan y una parte de Atlatlahucan. También pertenecen al Corredor Biológico Chichinautzin (CBC). Aguilar (1995:170) destaca la importancia de esta región debido a su aporte de agua al Distrito Federal y a la ciudad de Cuernavaca, región caracterizada por un régimen de lluvias intensas (1200 a 1500mm). En esta zona no existen escurrimientos superficiales por la litología permeable y el clima templado ha favorecido el establecimiento de ecosistemas forestales sobre las rocas permeables que filtran el agua de las lluvias y recargan los acuíferos. Las comunidades de Coajomulco del municipio de Huitzilac, San Juan Tlacotenco y Santo Domingo Ocotitlán del municipio de Tepoztlán, El Pedregal, El Vigía y Felipe Neri del municipio de Tlalnepantla, Nepopualco y Villa Nicolás Zapata del municipio de Totolapan, tienen como fuente primaria de abastecimiento a la lluvia. A través del tiempo han gestionado la captación de agua de lluvia, buscando disponer cantidades de agua en sus domicilios con cisternas y/o con las ollas (cisternas), a nivel comunitario, pero aún no se alcanza la dotación necesaria que garantice una continuidad en todo el año.



Figura 17: vista general de la reunión en IMTA.

4.1.2. Visita a dependencias de Laboratorios de Calidad y Potabilización de Aguas

La exposición acerca del rol que juega el laboratorio fue realizada por la Dra. Sofía Garrido Hoyos.

a) Laboratorio de Calidad del Agua

Esta unidad presta asesoría en el desarrollo e implementación de un Sistema de Gestión de Calidad, en base a la mantención de una red de Laboratorios de Calidad del Agua. Dentro de la labor que desarrollan se destaca:

- Desarrollo de los manuales de políticas, procedimientos de gestión y manuales analíticos, los que se desarrollan en conjunto con las entidades responsables.
- Capacitación en la norma NMX-EC-17025-IMNC-2006, criterios de aplicación y Políticas de la «Entidad Mexicana de Acreditación».
- Capacitación en las metodologías analíticas que se desarrollen en el laboratorio.
- Auditoría como parte de la preparación para recibir personal técnico de evaluación.

El laboratorio cuenta con las áreas de análisis Físicoquímicos, Cromatografía, de metales por Absorción Atómica, Microbiológicos, Toxicidad con organismos y de Mutagenicidad. Además, se encuentra acreditado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) en cumplimiento de la norma ISO/IEC 17025:2005 y aprobado por la Comisión Nacional del Agua. Cuatro de los especialistas participan como evaluadores en la EMA.

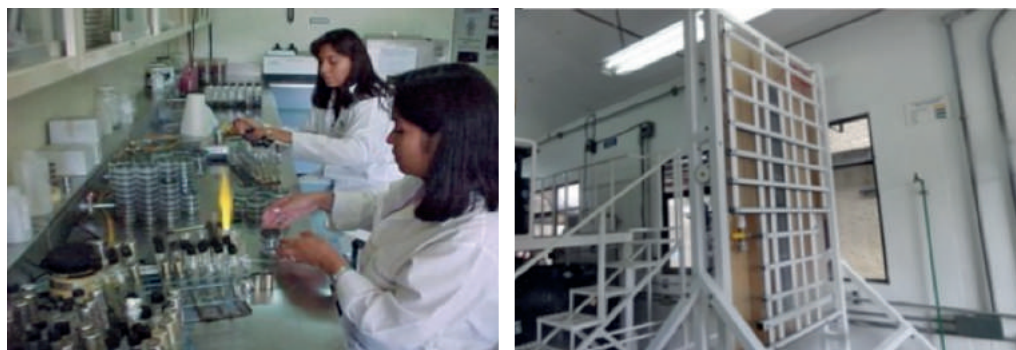


Figura 18: vista general del laboratorio.

b) Laboratorio de Potabilización de agua

El objetivo del laboratorio es el desarrollo, adaptación, servicios tecnológicos, transferencia y capacitación en procesos de potabilización de agua para uso y consumo humano, así como acondicionamiento de agua para la industria. Dentro de sus características se destacan:

- Evaluación de riesgos a la salud asociados a la contaminación del agua
- Evaluación de reactivos, equipos, membranas y procesos utilizados para la potabilización y acondicionamiento de agua.
- Pruebas de tratabilidad de agua y de sus subproductos (físicoquímicas y con procesos de membranas)
- Selección del mejor proceso según el tipo de agua.
- Diseño, seguimiento a la construcción y puesta en marcha de sistemas de potabilización.
- Evaluación de plantas potabilizadoras.

Por otro lado, el laboratorio cuenta con equipamiento de membranas para tratamiento de agua, con equipos de 1 l/s de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y osmosis inversa; equipamiento para autopsia y pruebas destructivas de membranas con equipo de fluorescencia de Rx y banco para pruebas no destructivas. También cuenta con tecnologías de procesos físicoquímicos (SGC) que cuenta con equipos para pruebas de jarras, equipos portátiles de análisis químicos de agua y plantas piloto de 1 l/s para tratamientos convencionales o con electrocoagulación. Finalmente, el laboratorio dispone de equipos y accesorios para el montaje de procesos de potabilización in situ. Cabe destacar que para el tratamiento de coliformes, según la opinión de los investigadores del IMTA, se pueden utilizar filtros de arena, gravilla y cloración.



Figura 19: vista general laboratorios de calidad y potabilización de agua.

4.1.3. Tecnologías apropiadas en el medio rural, comunidades indígenas y zonas marginadas

La presentación estuvo a cargo del Maestro e Ingeniero Miguel Ángel Córdova y fue realizada en el Departamento de Coordinación Hidráulica. En su presentación el profesional dio a conocer diferentes tecnologías apropiadas en materia de agua. Dichas tecnologías son de fácil instalación y no generan dependencia tecnológica. Para sus diseños se utilizan las máximas instantáneas de precipitación y en cuanto a las tecnologías mismas, se pueden mencionar las siguientes;

a) Casa Ecológica

La sustentabilidad de los recursos naturales cobra cada día más importancia. En este sentido, investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) desarrollaron en el 2007 una casa ecológica, es decir, una vivienda autosuficiente en agua, instalaciones sanitarias y energía eléctrica que se ha ido perfeccionando con el paso del tiempo.

Ante la necesidad de la falta de abastecimiento y saneamiento del agua en las viviendas, de la limitación de recursos económicos en zonas marginadas y rurales, pero por sobre todo del compromiso de atender a la población que vive en la pobreza y elevar la calidad de vida de los mexicanos, se desarrolló el modelo de casa ecológica. Este pretende investigar y evaluar la pertinencia de las tecnologías apropiadas que se transfieren para el abastecimiento y saneamiento del agua a nivel de la vivienda y desarrollar otras más que ayuden en la calidad de vida de las viviendas rurales y urbanas.

La casa ecológica está hecha de bloques de adobe colocados a doble espesor, con varas de carrizo puestas tanto en forma horizontal como vertical como refuerzo a lo largo y ancho de la casa, convirtiéndola en una construcción sísmo-resistente. El techo es de madera con láminas de fibrocemento de fabricación local y hojas de poliestireno que sirven como aislante térmico.

La casa de 66 m² de superficie comprende sala, comedor, tres recámaras y baño. El inodoro, la regadera y el fregadero cuentan con dispositivos ahorradores de agua. También cuenta con un fogón ahorrador de leña, el que reduce notablemente el consumo y aumenta el aprovechamiento del calor producido. Además, la casa tiene un sistema de desinfección solar, el cual elimina hasta el 99.99% de las bacterias en el agua para consumo humano.

Asimismo, la casa cuenta con un sistema de captación, conducción y almacenamiento de agua de lluvia. A través del techo, que está fabricado por láminas de fibrocemento, se realiza la captación del agua de lluvia. El agua captada se conduce mediante canaletas y tuberías de PVC, que luego de pasar por varios filtros llega a una cisterna con capacidad de 50 mil litros para su almacenamiento.

En el exterior de la casa se encuentra el sistema de tratamiento de aguas residuales, para que puedan ser reutilizadas sólo en riego parcelario.

Por medio de un tanque séptico, una trampa de grasas, un filtro anaerobio de flujo ascendente y un humedal de flujo subsuperficial, las aguas negras y grises generadas son tratadas para poder ser reutilizadas.

La casa ecológica cuenta con dos sistemas de bombeo: uno funciona con energía solar y sirve para llenar el tinaco de la casa; mientras que el otro trabaja mediante la acción mecánica del pedaleo de una bicicleta (bici bomba) que sirve para llevar el agua al tanque de descargas de fondo.

El huerto familiar está destinado a la producción de alimentos con fines de consumo y mide 6 x 12 metros. El sistema de riego está compuesto por un tanque de descargas de fondo, que al llenarse automáticamente abre una válvula que libera el agua y de esta manera se riega el huerto.

La casa ecológica cuenta con un calentador solar de agua y con un sistema que produce electricidad a partir de la luz solar, haciendo uso de fotoceldas. Este sistema actualmente es muy utilizado, tal como lo es en algunos hoteles.

Otros elementos importantes son el baño seco y el compostero, el cual se encuentra en el exterior de la casa y ayuda a separar los residuos sólidos que pueden utilizarse después como composta.

El baño seco es un sistema que no utiliza agua. Por medio de una taza especial, permite la separación de los desechos sólidos (que se van a un área de almacenamiento para ser transformados en composta) y líquidos (que pasan a un pozo de absorción). El sistema se basa en la instalación de dos cámaras las cuales son alternadas; mientras una está en uso, la otra permanece en reposo (de 6 a 12 meses) en proceso de descomposición de la materia fecal.

En el compostero se produce la composta a partir de desechos orgánicos (residuos de comida, poda y jardín, etc.) la cual permitirá nutrir el jardín y el huerto familiar.



Figura 20: vista general Medio Rural, comunidades Indígenas y Zonas marginadas.

Finalmente, la reunión programada con los investigadores del centro de investigación Colpos no se pudo llevar a cabo, pero se pudieron ver en terreno 3 unidades demostrativas en la utilización del agua lluvia para fines productivos y para consumo humano a través de la planta purificadora.

4.2. Gira técnica a Brasil

La actividad llevó por nombre “Gira tecnológica al Estado de Minas Gerais, Brasil”, cuyo financiamiento fue gracias a los fondos otorgados por el Gobierno Regional del Maule a través de los Fondos de innovación para la competitividad, FIC. La gira se realizó entre los días 24 al 30 de Noviembre de 2013.

La gira contempló la visita a la Universidad de Minas Gerais Campus Pampulha, Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Hidráulica y Recursos Hídricos, en donde se pudo conocer por parte del Investigador y Académico Dr. Luis Rafael Palmier, los alcances de los programas orientados a la construcción de las cisternas de acumulación de aguas lluvias presentes en Brasil, a saber, el Programa de 1 millón de Cisternas, “P1MC” y el programa de 1 tierra y 2 aguas, “P1+2”. Asimismo, se realizaron algunas visitas en el Estado de Minas Gerais, de manera de conocer in situ el desarrollo de cada una de las unidades en torno a ambos programas. Finalmente, la gira consideró algunas reuniones con la Agencia Nacional del Agua y la empresa Embrapa, con la finalidad de conocer la gestión y manejo de los recursos hídricos a nivel de cuencas, que se realiza en el ámbito privado y público.

4.2.1. Reunión con el Dr. Luiz Rafael Palmier, Universidad de Minas Gerais

En esta reunión partió la gira a terreno y en ella se conoció el origen del programa de las cisternas de aguas lluvias y el plan de desarrollo ejecutado en el semiárido del Brasil. En ella participaron el Dr. Luis Rafael Palmier, investigador y académico de la Universidad de Minas Gerais; y los Ingenieros Carolina Morales y Alejandro Abarza, investigadores del Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) de la Universidad de Talca.

En esta reunión, el Dr. Palmier señaló que a partir del año 2000, con el apoyo del Ministerio de Medio Ambiente de Brasil, se inició un proyecto piloto denominado Programa de Formación y Movilización Social para la Convivencia con el Semiárido: Un Millón de Cisternas Rurales (P1MC) que consiguió la movilización y capacitación de 15 mil familias y la construcción de 13,2 mil cisternas en 8 Estados brasileños.

Este programa partió de una iniciativa de la sociedad civil organizada con el objeto de garantizar el acceso al agua potable a familias en el semiárido brasileño, donde el problema de la escasez de agua para el consumo humano directo afecta a la supervivencia de esta población.

En 2003, la garantía del acceso a agua de calidad para consumo humano fue incorporada como componente fundamental de la Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional. El Gobierno Federal – por medio del Ministerio de Desarrollo Social y Lucha contra el Hambre – MDS, pasó a apoyar y financiar el Programa de Formación y Movilización Social para la Convivencia con el Semiárido, teniendo como meta movilizadora la construcción de un millón de cisternas rurales.

Desde 2003, el MDS apoya y financia programas de construcción de cisternas y formación para que las comunidades locales convivan con el Semiárido.

Entre sus principales implementadores, se destacan el Consorcio de Desarrollo de la Región de Ipanema y el ASB (Articulación en el Semiárido Brasileño) – fórum que congrega más de 750 organizaciones de la sociedad civil, ONG's de desarrollo y ambientalistas, asociaciones de trabajadores/as rurales y urbanos/as, entidades comunitarias, sindicatos y federaciones de trabajadores/as rurales, movimientos sociales y organismos de cooperación internacional públicos y privados, que trabajan para el desarrollo social, económico y político sostenible del Semiárido Brasileño. Hasta junio de 2009, 202.066 mil personas fueron capacitadas en gestión de recursos hídricos; 8.515 mil albañiles fueron formados en técnicas de construcción de cisternas; 4.114 mil jóvenes fueron capacitados en confección e instalación de bombas manuales y 202.066 mil cisternas domiciliarias de 16 metros cúbicos fueron construidas. Tratándose de las mujeres, la disponibilidad de agua de lluvia en las casas promueve más comodidad y garantiza más tiempo para que cuiden de sus propias vidas, ya que muchas dedicaban hasta 4 horas/día en ir a buscar y transportar el agua para el abastecimiento de la familia.

Respecto de otras fuentes de financiamiento, el Dr. Palmier indica que a contar de Marzo del año 2010 se concretó el Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento, destinado a financiar un programa ambicioso de construcción de cisternas.

4.2.2. Visita a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, EMBRAPA

En dicha actividad participó el Sr. Luciano Cordoval de Barros, representante de EMBRAPA, el Dr. Luiz Rafael Palmier, académico de la Universidad de Minas Gerais, y los investigadores Carolina Morales y Alejandro Abarza, ambos del Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) de la Universidad de Talca.

La empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA), es dependiente del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento, creada en el año 1973, cuyo objetivo es generar soluciones de investigación, desarrollo e innovación para la agricultura sostenible en beneficio de la sociedad Brasileña.

EMBRAPA opera a través de la investigación que realiza con Unidades de Servicio y de Administración que están presentes en casi todos los estados del país. El presupuesto de la empresa para el 2013 fue de US \$ 2,3 mil millones.

Esta compañía se caracteriza por realizar una inversión principalmente en la formación de recursos humanos. La empresa en su total cuenta con 9.795 empleados, de los cuales 2.427 son investigadores; de estos el 18% cuenta con una maestría, el 74% con doctorado y el 7% con post-doctorado.

EMBRAPA cuenta con programas de investigación específicos que tratan de organizar tecnologías y sistemas de producción, para aumentar la productividad de la agricultura familiar y de los pequeños productores, lo que permitirá incorporarlos en la agroindustria, asegurando de esta forma una mejora en sus ingresos y el bienestar de sus familias.

En el ámbito de la cooperación internacional, la compañía cuenta actualmente con 78 acuerdos bilaterales establecidos con 56 países y 89 instituciones extranjeras de investigación, principalmente agrícolas. Se busca la investigación que favorezca la transferencia de la tecnología. Para ayudar en este esfuerzo, EMBRAPA ha establecido alianzas con laboratorios en los Estados Unidos y Europa (Francia, Alemania e Inglaterra), para el desarrollo de la investigación en tecnologías de vanguardia.

4.2.3. Presentación Proyecto “Sistemas de Captación de Aguas Superficiales de Lluvias en Barraginhas”

Las Barraginhas son técnicas que nacen de la búsqueda de iniciativas contra la degradación del suelo. Esta tecnología se inicia en el año 1991 con la construcción de las primeras obras de contención de inundaciones en la zona experimental de Embrapa Maíz y Sorgo, en Sete Lagos, estado de Minas Gerais. Para el año 1994 fueron construidas 28 Barraginhas en un sitio del Municipio de Aracaí en Minas Gerais. Al año siguiente se construyeron 30 barraginhas en la Granja Trastero, con lo que crea e implementa el Proyecto de Ribeirao Trastero, que consideró la construcción de barraginhas a lo largo de los cursos principales. Actualmente en la Región de Siete Lagos, estado de Minas Gerais, se han construido más de 5.000 barraginhas. La idea es construir una barrera al paso del agua superficial, que permite acumularla para el periodo de mayor escasez, a la vez que facilita la infiltración del agua en el suelo.

De esta forma, estos proyectos están orientados a la recuperación de las áreas degradadas por el escurrimiento superficial de las aguas lluvias, con el fin de perpetuar y revitalizar los cursos de agua de buena calidad, así como también hacer del Valle de Trastero una unidad demostrativa de conservación del suelo y el agua para todos el Estado de Minas Gerais y de otras regiones del país.

Las Barraginhas, en general poseen un radio de 8 a 16 metros y tienen una profundidad de 1 metro. Dichas obras tienen 2 propósitos; Recarga de agua para uso humano y para consumo animal. Lo recomendable es que el área sea más ancha que larga.

Al año 2013, en Brasil se han construido alrededor de 500 mil unidades en 40 comunidades. Sólo en el estado de Minas Gerais las cifras llegan a 200 mil barraginhas. Del total de unidades construidas, el 70% ha sido financiado con recursos de privados, como por ejemplo la empresa PETROBRAS.



Figura 21: visita Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, Embrapa.

4.2.4. Visita a terreno a Unidades de los programas P1MC y P1+2

El Nordeste brasileño es una región tropical con más de 1,5 millón de Km², donde se verifica una gran mancha de zonas semiáridas, abarcando 70% de esta área e influyendo en un 63% de su población. Es justamente en el semiárido brasileño, donde se encuentra el mayor número de establecimientos agrícolas familiares de Brasil. En esta región se concentra también más de dos tercios de los pobres rurales brasileños y, según estimativas del Instituto de Pesquisas e Economía Aplicada – IPEA, más de la mitad de la población es víctima de hambre y de malnutrición.

El semiárido brasileño, desde el punto de vista físico-climático, se caracteriza por temperaturas elevadas, por sobre los 26 °C, y dos estaciones distintas: una seca, en la cual llueve muy poco, y una húmeda, cuando se dan precipitaciones irregulares

El semiárido brasileño posee una extensión de 969.589,4 km² y está compuesto por 1.133 municipios de los Estados de Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia (todos estos estados situados en la región nordeste) y el norte de Minas Gerais (situado en la región sudeste), totalizando una población de 20.858.264 personas; 44% de éstas reside en la zona rural.

Las experiencias de resiliencia de vida desarrolladas por agricultores/as familiares, están insertas en el contexto de agudizar el ingenio para retener el agua y ello incluye cisternas, pozos rasos, pozos amazonas, barragens subterráneas, tanques de piedras, diferentes formas de regadío, huertas productivas, cercas vivas, cobertura muerta, plantío en curvas de nivel y en micro-cuencas y manejo de sistemas agroforestales, entre otras innovaciones técnicas y sociales.

De esta manera, la principal prioridad del programa es proporcionar agua en cantidad y calidad suficientes a la población de la región semiárida brasileña, así como la educación y la movilización social asociadas a estos recursos hídricos. El objetivo principal del P1MC es construir un millón de cisternas para la recogida y almacenamiento de agua de lluvia. Estas cisternas pueden almacenar hasta 16.000 litros de agua, cantidad suficiente para servir a una familia de cinco miembros durante ocho meses de sequía en el semiárido, para uso exclusivamente doméstico (beber y cocinar). El agua se recoge en los canalones de evacuación de los tejados limpios. Las cisternas las construyen los campesinos formados en albañilería, con la colaboración de las familias que después las usarán.

La cisterna es una tecnología simple, de bajo costo y adaptable a cualquier región. Son cilíndricas, cubiertas y de formato semienterrada, donde el agua es recolectada de la lluvia a través de los canales o canaletas instalados en los techos.

Las placas de la cisterna se construyen de hormigón prefabricado (figura 22) realizado por la propia comunidad. La construcción se realiza por albañiles de las localidades, los que han sido educados y entrenados por P1MC.

Con la cisterna, cada familia es independiente, autónoma y libre de elegir sus propios gestores públicos, además de llegar a conocer otras técnicas para hacer frente al semiárido, produciendo con ello una mejor salud y más tiempo para el cuidado de los niños, el estudio y la vida en general.



Figura 22: construcción de Cisterna, Hormigón prefabricado.

4.2.5. Programa Un millón de cisternas, P1MC

A partir del año 2000 y con el apoyo del Ministerio de Medio Ambiente de Brasil, se inició un proyecto piloto denominado Programa de Formación y Movilización Social para la Convivencia con el Semiárido: Un Millón de Cisternas Rurales (P1MC), que consiguió la movilización y capacitación de 15 mil familias y la construcción de 13,2 mil cisternas en 8 estados brasileños.

El P1MC es una de las acciones de la Formación y Movilización Social para la Convivencia en la región semiárida Brasileña. Esta ha promovido un movimiento de la convivencia conjunta y sostenible con el ecosistema semiárido a través del fortalecimiento de la movilización de la sociedad civil y de la participación y el empoderamiento de las familias, con una propuesta de una educación de procedimiento. El objetivo del P1MC es beneficiar a unos cinco millones de personas en la región semiárida con agua potable para beber y cocinar a través del agua acumulada en cisternas. Juntos forman una infraestructura descentralizada, con la capacidad de suministrar 16 mil millones de litros de agua.

El programa está dirigido a familias con ingresos de hasta medio salario mínimo, con residencia permanentemente en las zonas rurales y que no cuenten con acceso al sistema de suministro público de agua.

Una estimación general del total de los recursos invertidos en el P1MC, corresponde a unos USD 711.211.792,09. El programa cuenta con la colaboración del Gobierno Federal a través del programa Fome Zero (Hambre Cero), del Ministerio de Desarrollo Social y Lucha contra el Hambre (MDS); asimismo, otras colaboraciones estatales y municipales establecidas aseguran la financiación y la operatividad del programa. Aparte del MDS, están entre los colaboradores la Federação Brasileira dos Bancos (Febraban), Petróleo do Brasil S.A (Petrobras), la Fundação Banco do Brasil y la Rede de Tecnología Social.

4.2.6. Unidad demostrativa Localidad de Ignacio Felix, Municipalidad de Novas

Esta Unidad demostrativa está implementada a través del programa P1MC y en sus predios se pueden observar cisternas de acumulación de aguas lluvias y Barraginhas para el riego de sus cultivos y para el cultivo de peces como se muestran en la figura 23.

En relación al riego para sus cultivos, este es efectivo utilizando un sistema de distribución por medio de una manguera negra de ½ pulgada de diámetro, la cual por gravedad llega al huerto de hortalizas y riega por aspersión. Siempre la oferta de agua proviene de la cisterna de acumulación de aguas lluvias, la que es alimentada desde los techos en donde se utilizan las canaletas para su conducción.

Respecto del período de lluvia, este corresponde al periodo entre Octubre y Mayo. Sin embargo, el 90% de las precipitaciones se concentran en 3 meses, lo que promedia 900 mm al año.



Figura 23: Programa P1MC, Localidad de Ignacio Felix.

4.2.7. Unidad demostrativa Municipio de Itaobim

Es habitual que en el recorrido por sectores de Brasil se visualicen cisternas domiciliarias en casas y escuelas, las que pertenecen o han sido implementadas por el programa de 1 millón de cisternas, PIMC. Es el caso de la propiedad de la Sra. Rodríguez da Silva, quien cuenta con una cisterna de acumulación de agua lluvia solo para consumo humano. Esta obra de acumulación posee un volumen de almacenamiento de 16 m³ y fue construida en el mes de Agosto del año 2013 y que corresponde, según su identificación, a la cisterna n° 547.194 del programa.

Esta cisterna, está construida en ferrocemento y está semienterrada con un sistema de captación de aguas lluvias a través del techo de la casa, utilizando las canaletas para su conducción.



Figura 24: Programa PIMC, Municipio de Itaobim.

4.2.8. Cisternas Utilizadas en Escuelas

El proyecto de las cisternas en las escuelas fue creado con la intención de garantizar el derecho al agua para los niños y adolescentes en la región semiárida. De acuerdo con el derecho a aprender, el informe elaborado por UNICEF en 2009 daba cuenta que de 37.600 escuelas rurales de la región semiárida de Brasil, 28.300 no contaban con servicios básicos como el agua pública.

Las primeras experiencias con cisternas en las escuelas (figura 25), surgen en el año 2009 a partir de un debate sobre el agua en las escuelas dirigidas por el Concejo Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional (CONSEA). El proyecto piloto se llevó a cabo en Bahía a través de una asociación entre ASA Bahía, el Asesor Assuruá Center (CAA), MDS y la Secretaría de Desarrollo Social y Lucha contra la Pobreza (Sede), y desde el año 2010, el experimento se extendió a todos los estados semiáridos bajo la coordinación de la ASA Nacional. La iniciativa se inserta en el PIMC como parte de las iniciativas para la captación de agua para el consumo humano.

Las cisternas en las escuelas se están construyendo en dos tamaños. Uno tiene la capacidad para almacenar 52.000 litros, siguiendo el modelo de la ASA e implementado en el programa P1+2. Las otras almacenan hasta 30.000 litros y sigue el formato construido por el CAA, es decir, en ambos casos los modelos de estas cisternas ya han sido probados por las familias.

Adicionalmente, este programa considera que las escuelas que participan en el proyecto, reciban materiales educativos para trabajar con los niños en el aula sobre temas directamente relacionados con la vida cotidiana de los estudiantes y la comunidad, como es el caso del Agua, la Vida y Alegría, focalizados en libros y cuentos.



Figura 25: Programa *PIMC*, Cisternas de acumulación de aguas lluvias en Escuelas.

4.2.9. Programa Una Tierra y Dos Aguas, *P1+2*

El Programa de una Tierra y Dos Aguas (*P1+2*) es una de las acciones de la Formación y Movilización Social para Vivir con el Semiárido, que tiene por objetivo fomentar la construcción de procesos en el desarrollo rural participativo en la región semiárida de Brasil. Este programa pretende también promover la soberanía, la seguridad alimentaria y la nutrición, y la generación de empleo e ingresos para las familias campesinas a través del acceso a la gestión sostenible de la tierra y al agua para la producción de alimentos. De esta manera la composición del nombre del programa declara que las siglas significan lo siguiente: *P1* define que la tierra está destinada a la producción y el *2* corresponde a dos tipos de agua: potable para el consumo humano y agua para la producción de alimentos.

Las familias atendidas por el programa *P1+2* deben cumplir con algunos de los siguientes criterios:

- a) Familias con acceso al agua para consumo humano que poseen tanques del *PIMC*.
- b) Mujeres jefas de hogar.
- c) Familias con niños de 0-6 años de edad.
- d) Niños y adolescentes que asisten a la escuela.
- e) Adultos mayores de 65 años.
- f) Personas con necesidades especiales, con características de suelos de formación de roca (cristalino, sedimentarias, areniscas).

Las tecnologías adoptadas por *P1+2* son simples, baratas y de dominio de los hombres y las mujeres agricultoras (figura 26). Hay varios tipos de implementaciones para captar agua para la producción de alimentos. Actualmente, *P1+2* trabaja con siete tipos: peatonal-tanque, tanque-escorrentía subterránea presa, barreiro trinchera, barraginha, piedra tanque y la bomba de agua popular.



Figura 26: Programa *P1+2*, Cisternas de acumulación de aguas lluvias y áreas de captación.

La captura de agua lluvia se realiza a través de un área de cemento de 200 m², construida en el suelo. Con esta zona de captación, se requieren aproximadamente 300 mm de lluvia para llenar el tanque de acumulación que posee una capacidad de almacenamiento de 52.000 litros. Adicionalmente, se cuenta con un sistema de tuberías dotado de filtros de arenas para dirigir el agua lluvia, que cae en el área de captación, hacia el aljibe enterrado y construido cerca de la zona de producción (figura 27).

El agua recogida y almacenada en estos aljibes cisternas, se utiliza para el riego de jardines, árboles frutales productivos, siembra de hortalizas y plantas medicinales, y para la crianza de animales.



Figura 27: Programa P1+2, Cisternas de acumulación de aguas lluvias en zonas productivas. A través del programa P1+2, más de 28.000 familias tienen acceso al agua para la producción de alimentos en el semiárido.

4.2.10. Unidad Demostrativa Comunidad Humaita Municipio de Itinga

En esta unidad visitada, se observa la implementación de una cisterna de aguas lluvias con 3 propósitos: consumo humano, uso agrícola y bebederos de animales. Es una cisterna que les permite acumular 52 mil litros, lo que asegura el riego de sus cultivos y frutales (figura 28).

Las actividades de esta familia se enmarcan en una agricultura de autoconsumo con un pequeño margen para la comercialización de sus productos como bananos y papayas. Sin embargo, el fuerte de los ingresos de esta familia es la crianza de animales.

Adicionalmente, en esta unidad se contempla otra cisterna de capacidad de almacenamiento de 16 mil litros, cuya captación de agua de lluvia se realiza a través de los techos, utilizando las canaletas, y se implementa en el marco del programa de 1 millón de cisternas, P1MC. De esta manera, esta unidad cuenta con la implementación de obras financiadas por los dos programas de captación de aguas (P1MC y P1+2), con el fin de satisfacer las necesidades productivas a pequeña escala, así como el consumo humano y siempre orientado a la unidad de una familia.



Figura 28: cisternas de acumulación de aguas lluvias, Comunidad Humaita Municipio de Itinga.

5 - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y ACUMULACIÓN DE AGUAS LLUVIAS, SCALLS

5.1. Selección de Sitios para la Construcción de las Unidades

En la selección de los sitios en que se implementó este tipo de obras, se consideraron diversos aspectos para que dichas obras fueran afines con los objetivos que se plantearon, en cuanto al volumen y destino de las aguas recolectadas.

La construcción de los SCALLs es especialmente recomendada en zonas que presentan problemas asociados a la escasez de agua, en tanto que es una alternativa viable de disponibilidad de recursos hídricos, particularmente para enfrentar la época estival.

Existen varias zonas a lo largo del país que durante todo el año o gran parte del mismo no cuentan con disponibilidad de agua, ni siquiera para el consumo humano. Estas zonas son críticas y en los últimos años son varias las comunas y provincias que han sido declaradas zonas de Catástrofe, Emergencia Agrícola o Escasez Hídrica, por parte de los Ministerios del Interior, de Agricultura y Obras Públicas, derivado de los efectos producidos por el déficit hídrico que afecta a estas zonas del país.

Un elemento principal y considerado desde un punto de vista social, fue la ruralidad de la zona, la superficie de la comuna y la población involucrada. Para una comuna, un primer criterio de selección fueron los sectores en donde el Municipio entrega agua con camión aljibe e interviene en el territorio a través del Programa de Desarrollo Local PRODESAL. Para ello, es necesaria una estrecha relación con el Municipio y los equipos técnicos que conforman cada unidad operativa del programa, como también con el Departamento de Fomento y las unidades de emergencia de cada institución.

Uno de los criterios principales al momento de considerar la ubicación de los sistemas SCALLs, fue la accesibilidad del lugar y el espacio disponible para la construcción de las obras. Este aspecto es relevante, puesto que significó, en muchos casos, problemas para la implementación de la obra en terreno y/o aumentos considerables en los presupuestos, los cuales pueden definir la factibilidad técnica y económica de implementación de las estructuras.

De igual forma, fue necesario establecer qué tipos de soluciones se iban a implementar. Así, se pudieron considerar las soluciones a nivel comunitario, que son de menor costo por metro cúbico de agua, por la economía de escala, o las soluciones a nivel individual, que se deben destacar por ser soluciones de alto valor social. En ambas, se debió cumplir que la comunidad o grupo familiar denotara escasas posibilidades o baja capacidad de acceder a otras fuentes alternativas del recurso.

Las características del propietario, tales como la responsabilidad, el compromiso con la mantención de las obras, la necesidad de agua y el impacto potencial a producir, fue otro elemento que se debió considerar al momento de la selección del sitio y para la construcción eficiente de este tipo de obras.

Los aspectos constructivos de los SCALLs consideran en general su fabricación en zonas de cotas por sobre el punto que se desea abastecer, de modo que el agua pueda llegar por gravedad desde este punto hasta cualquier lugar de la propiedad donde se desee disponer de ella. Sin embargo, no siempre fue posible tener las condiciones adecuadas para lograr lo anterior. Como la estructura solo podía ubicarse en un punto con cota más baja que la zona a abastecer, fue necesario considerar la implementación de bombeo en la que una alternativa recomendable fueron los sistemas de bombeo fotovoltaico u otros de alta eficiencia energética.

Por otra parte, estas tecnologías pueden ser implementadas en zonas estratégicas que puedan por ejemplo servir en el combate de incendios forestales u otras zonas de alto riesgo en que se requiera fortalecer la capacidad de respuesta ante este tipo de emergencias. Finalmente, la distribución de los sitios quedó de la siguiente forma:

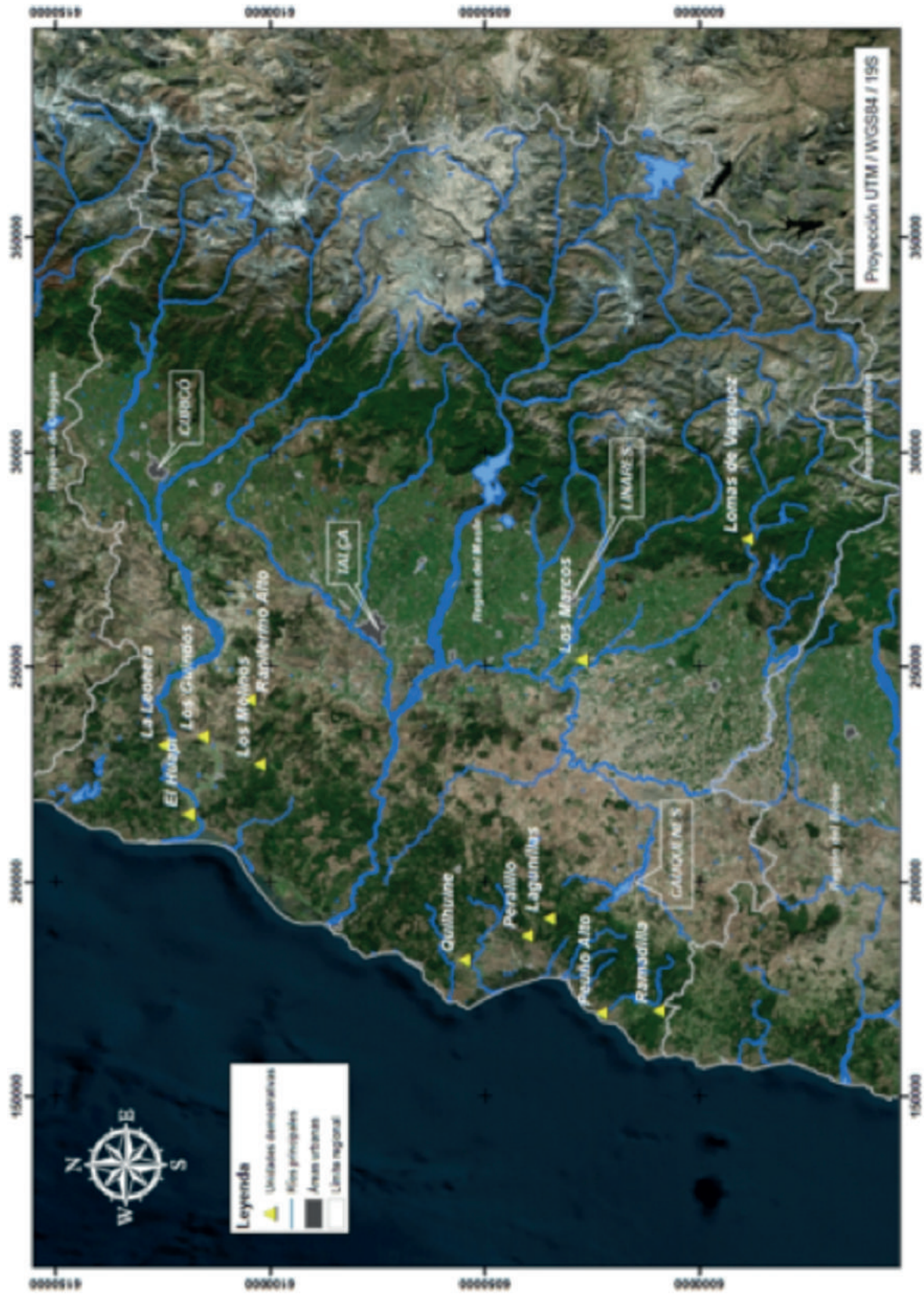


Figura 29: plano de ubicación de los Scalls en la Región del Maule.

5.2. Caracterización Hidrológica de los Sitios

La caracterización hidrológica de los sitios en donde se deberán implementar los sistemas SCALLs, es un proceso medular para el buen éxito de las obras, pues a partir de este análisis, se podrá definir la real capacidad de abastecimiento de agua en función de las disponibilidades y de las necesidades que una determinada zona posea.

5.2.1. Selección de las estaciones

Cada sitio debe ser caracterizado hidrológicamente, en términos de las ofertas de agua en periodos mensuales y anuales. Para ello, se utilizaron los registros históricos de estaciones pluviométricas cercanas a los sitios en que se deseaban instalar los sistemas. Para conocer la precipitación anual y su comportamiento en el tiempo, fue necesario consultar las bases de datos de la Dirección General de Aguas, la Dirección Meteorológica de Chile o cualquier otra entidad afín que tuviese datos de precipitación de buena calidad. En esta etapa, se consideraron la o las estaciones más cercanas y una adecuada longitud de la serie de datos (de al menos 15 años, aunque de ser posible es adecuado tender a series mayores a 30 años).

5.2.2. Tratamientos estadísticos

Para cada sitio seleccionado, se debe definir la precipitación de diseño en términos de la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones a través de funciones de distribución de probabilidad.

5.2.2.1. Definición de los estadígrafos de posición

En primer lugar, para la serie de datos, se determinaron los estadígrafos de posición, también llamados de tendencia central, que indican alrededor de qué valor se agrupan los datos obtenidos, como es el caso de la media. También se estiman los estadígrafos de dispersión, que indican globalmente si los datos se dispersan más o menos en torno a la media. Así, se tiene lo siguiente:

- Media o promedio: es el valor esperado de la variable misma o primer momento respecto al origen. Muestra la tendencia central de la distribución y su valor estimado a partir de la muestra, es:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde n es el tamaño total de la muestra y x_i el valor a asumir por la variable.

- Desviación Estándar: es una medida de la variabilidad, ya que es la raíz cuadrada de los cuadrados de las diferencias y su valor estimado se denota como:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Este estadígrafo de posición permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media, dando como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media.

5.2.2.2. Definición de las Funciones de Distribución de Probabilidad

Según Chow *et al.* (1994), a un conjunto de observaciones x_1, x_2, \dots, x_n , de una variable aleatoria, se le denomina muestra. Una muestra es sacada de una población hipotéticamente infinita, que posee propiedades estadísticas constantes. Las propiedades de una muestra pueden cambiar de una muestra a otra. El conjunto de todas las muestras posibles que puede extraerse de una población se conoce como espacio muestral, en donde un evento es un subconjunto muestral. Si las observaciones de una muestra están idénticamente distribuidas, estas pueden ordenarse para formar un histograma de frecuencia. Ahora bien, si el número de observaciones n_i , en el intervalo i que cubre un cierto rango, se divide por el número total de observaciones n , el resultado se conoce como frecuencia relativa. Asimismo, la suma de los valores de la frecuencia relativa hasta un punto dado es la función de frecuencia acumulada, y en su límite, cuando $n \rightarrow \infty$ y $\Delta x \rightarrow 0$, se denomina función de distribución de probabilidad (F.D.P.). De igual forma, la derivada o incremento finito de la F.D.P. se conoce como función de densidad de probabilidad (f.d.p.).

Adicionalmente a lo anterior, Pizarro y Novoa (1986) afirman que para conseguir definir la probabilidad implícita es preciso consignar dos conceptos previos, que son el período de retorno y la probabilidad de excedencia.

- Período de Retorno (T): se define como el período de tiempo que transcurre entre dos eventos o sucesos de similares características (precipitaciones, caudales, temperaturas, etc.). Generalmente se expresa en años (Pizarro *et al.*, 2004).
- Probabilidad de Excedencia: se define como la probabilidad de que un valor de la variable aleatoria, sea excedido. Se encuentra asociada al período de retorno (Pizarro *et al.*, 2004).

De esta forma,

$$\text{Probabilidad de Excedencia} = P(X) = \frac{1}{T}$$

Expresado de otra forma, la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor igual o inferior a cierto número X , está dada por la función de distribución de probabilidad definida como $F(x)$ (Pizarro y Novoa, 1986).

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

Por otro lado, la probabilidad de que x (precipitación de diseño) sea mayor que X (precipitación real), viene dada por la función complementaria, también conocida como probabilidad de excedencia:

$$P(x > X) = 1 - F(X) = \frac{1}{T}$$

Para este caso, se trabajó con una probabilidad de excedencia de 0,9 o con una probabilidad de 0,1. Es decir, la precipitación de diseño deberá ser superada en al menos 9 de 10 años, con lo cual se asegura que en esos años se contará con el volumen de agua disponible definido en el diseño. Esto se basa en que esta probabilidad es considerada rentable desde un punto de vista económico, ya que, si bien al trabajar con probabilidades superiores se puede establecer una estructura que en 99 de cada 100 años se almacenará el volumen requerido, ello determinaría una subutilización muy alta de la infraestructura construida, transformándolo en un alto costo de oportunidad. Por ello, se estima que un 90% es una probabilidad de éxito recomendable (Pizarro, 2004).

5.2.2.3. Ajuste a una Función de Distribución de Probabilidad

Luego de haber definido la probabilidad de excedencia, se debe proceder a ajustar los registros de lluvias a una Función de Distribución de Probabilidad. En este proyecto se ajustaron las series de datos con la F.D.P. de Gumbel,

dado que ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste a precipitaciones en distintos períodos de tiempo (Pizarro y Novoa, 1986). Sin embargo, existen otro tipo de distribuciones altamente usadas, como lo son las F.D.P. de Goodrich, Log-Normal y Pearson III, entre otras.

La función de distribución acumulada de Gumbel se define mediante la siguiente expresión:

$$F(X) = e^{-e^{-d(x-\mu)}}$$

Donde:

- X = Valor a asumir por la variable aleatoria (precipitación de diseño).
- d y μ = Parámetros a ajustar de la función.
- e = Constante de Neper.

Los parámetros de la distribución de una muestra de tamaño infinito tienden a los siguientes valores, en base a la media aritmética y la desviación estándar de la muestra:

$$d = \frac{1}{0,779696 * S} ; \mu = \bar{x} - 0,450047 * S$$

Donde \bar{x} es la media de la muestra y S su desviación estándar.

En cuanto a las restantes F.D.P. nombradas, la función de Distribución de Goodrich se define mediante la siguiente expresión (Pizarro et al., 1985):

$$P(x \leq X) = F(X) = 1 - e^{-\alpha(X-X_1)^{1/P}}$$

Para $x_1 < x \leq \infty$

Donde:

- X = Valor a asumir por la variable aleatoria
- α , p y X_1 = Parámetros a estimar en función de los valores de la muestra.

Esta F.D.P. posee la cualidad de eliminar valores extremos, es decir, aquellos cuya probabilidad de ocurrencia es muy pequeña. Por lo mismo, consigue suprimir las distorsiones que pueda provocar un solo valor anómalo.

En cuanto a los parámetros, éstos se determinan a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{m_3}{S^3} = P(p);$$

$$\alpha^{2p} = \frac{1}{S^2} [\Gamma(2p+1) - \Gamma^2(p+1)];$$

$$X_1 = \bar{X} - \frac{\Gamma(p+1)}{\alpha^p}$$

Donde:

- m_3 = Momento central de orden tres,
- S^3 = Desviación típica al cubo.
- P(p) = Función auxiliar de Goodrich.
- S^2 = Varianza muestral.
- Γ = Función Gamma.
- \bar{X} = Media muestral.

El momento central de orden tres se define como la sumatoria de los desvíos de la serie de datos, con respecto a su media elevados al cubo, y cuya sumatoria se divide por el número de datos.

$$m_3 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^3}{n}$$

La función auxiliar de Goodrich permite asimilar, para este caso, la expresión m_3/S^3 , a través de la cual es posible determinar p . En el Anexo 1 de este documento, se presenta la tabla A1 con los valores a asumir por la función P auxiliar de Goodrich.

Al observar el sistema de ecuaciones, se advierte que este considera para su resolución, la utilización de la función Gamma. La tabla A2, ubicada en el Anexo 1, entrega los valores de la función Gamma, a la que se debe entrar por la parte izquierda, y tras ubicar el segundo decimal, se determina la fila y columna que expresa el valor a asumir por la función.

Otra de las F.D.P. ampliamente utilizadas y que es importante de considerar, es la Distribución Log-Normal. Esta F.D.P. tiene desventajas sobre la distribución normal, debido a que está limitada a $X > 0$. Además, la transformación Log tiende a reducir la asimetría positiva comúnmente encontrada en la información hidrológica, ya que al tomar los logaritmos se reduce una proporción mayor de los números grandes en relación a los pequeños (Chow *et. al.*, 1994).

La función de distribución acumulada de Log-Normal se define mediante la siguiente expresión:

$$F(X) = \frac{1}{2\pi x(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - a}{\beta}\right)^2} dx$$

Donde los parámetros existentes que se basan en los logaritmos de la variable aleatoria están definidos de la siguiente forma:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - a)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- x = Representa el valor a asumir por la variable aleatoria.
- α, β = Parámetros.
- e = Constante de Neper.

En el mismo caso que la distribución normal, se asigna z como una variable estandarizada:

$$z = \frac{\ln x - a}{\beta}$$

Y la probabilidad se encuentra en la tabla Normal, donde el valor de la variable x es:

$$x = e^{\beta z + \alpha}$$

Por último, la otra función nombrada (entre varias más existentes), es la Distribución Pearson Tipo III, aplicada por primera vez en la hidrología por Foster (1924), para poder describir la probabilidad de caudales máximos

anuales. Cuando la información es muy asimétrica positivamente, se utiliza una transformación Log para reducir su asimetría. Esta se presenta de la siguiente forma (Chow *et al.*, 1994):

$$F(X) = \frac{1}{2\pi x (\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\beta}\right)^2 dx$$

Donde los parámetros de la distribución pueden ser estimados en función del promedio \bar{X} y la desviación estándar (S) de la muestra, por medio de las siguientes expresiones:

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}} ; \quad \beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2 ; \quad \delta = \bar{X} - \alpha\beta ; \quad \gamma = \sum_{i=1}^n \frac{(xi - \bar{X})^{3/n}}{S^3}$$

Donde:

- γ = Coeficiente de sesgo.
- α, β y δ = Parámetros.
- S = Desviación típica.
- \bar{X} = Media aritmética.

Asimismo la variable estandarizada γ se presenta a continuación:

$$\gamma = \frac{x - \delta}{\alpha}$$

Posteriormente, el ajuste se realiza a través de la tabla chi-cuadrado, donde:

$$x^2 = 2\gamma \quad ; \quad \mu = 2\beta$$

Por lo tanto, el valor que asume la variable aleatoria x a partir de lo anteriormente señalado, se define como:

$$x = \gamma\alpha + \delta$$

Y la probabilidad es obtenida a través de los valores presentes en la tabla de percentiles de la distribución x^2 , con n grados de libertad.

5.2.2.4. Pruebas de bondad del ajuste

Luego del ajuste de la función de distribución a los datos de precipitación, es necesario definir la calidad del ajuste obtenido. Para ello se utilizan diversas pruebas, pero en hidrología se utiliza mayormente el test Kolmogorov-Smirnov y el Coeficiente de Determinación R^2 , ya que, según Pizarro y Novoa (1986), estas pruebas determinan el nivel de asimilación de los datos observados de una variable cualquiera a una función matemática previamente establecida y reconocida. Mediante estas pruebas, se valida la posibilidad de interpolar y extrapolar información.

El test Kolmogorov-Smirnov es una prueba de normalidad basada en el valor absoluto de la máxima diferencia entre la distribución acumulada observada y la teórica. Es utilizada para verificar la hipótesis de que cierta muestra procede de una distribución particular (Pizarro *et al.*, 2004).

Del párrafo anterior se desprende la necesidad de determinar la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada. Las frecuencias observadas se ordenan de menor a mayor y luego se aplica la siguiente expresión de Weibull:

$$Fn(X) = \frac{n}{N + 1}$$

Donde:

- $F_n(X)$ = Frecuencia observada acumulada.
- n = Número de orden ascendente de la serie de datos.
- N = Número Total de datos.

Por su parte, la frecuencia teórica acumulada es determinada mediante la función de distribución correspondiente.

Para finalizar con el test, se calcula el supremo de las diferencias, que consiste en determinar el valor absoluto de la máxima diferencia entre las frecuencias observadas y las acumuladas. Esta diferencia se denomina por la letra D y su expresión es la siguiente:

$$D = \text{Sup} | F_n(X)_i - F(X)_i |$$

Donde:

- D = Supremo de las Diferencias.
- $F_n(X)_i$ = Frecuencia Observada Acumulada en la i -ésima posición.
- $F(X)_i$ = Frecuencia Teórica Acumulada en la i -ésima posición.

Una vez obtenido el supremo de las diferencias, se compara con el valor de la tabla Kolmogorov-Smirnov con una confiabilidad del 95% y n grados de libertad. Si el valor obtenido de la tabla K-S (D_t) es mayor que el supremo de las diferencias (D_c), se puede aceptar el ajuste. Según lo anterior se debe cumplir lo siguiente:

$$D_t \geq D_c$$

Al cumplirse esta condición, se acepta que el ajuste es adecuado a la Función de Distribución de Probabilidad utilizada y con el nivel de confiabilidad asumido. (Pizarro *et al.*, 2004)

Por otra parte, el coeficiente de determinación señala qué proporción de la variación total de las frecuencias observadas, es explicada por las frecuencias teóricas acumuladas (Pizarro y Novoa, 1986). La expresión que define al coeficiente de determinación es la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (F_n(X)_i - F(X)_i)^2}{\sum (F_n(X)_i - \bar{F}_n(X))^2}$$

Donde:

- R^2 = Coeficiente de determinación $0 \leq R^2 \leq 1$.
- $F_n(x)_i$ = Frecuencia observada acumulada.
- $F(x)_i$ = Frecuencia teórica acumulada.
- $\bar{F}_n(X)$ = Media de las Frecuencias observadas acumuladas.

5.2.2.5. Ejemplo Práctico de Cálculo

El ejemplo contempla la estación Huilliborgoa (35°18'23" S; 71°31'24" O), ubicada en la comuna de San Rafael, en la Región del Maule. En este caso, se considerará un período de registro comprendido entre los años 1992 – 2013 (22 datos anuales de precipitación). Estos datos se ajustarán con la F.D.P de Gumbel, la cual fue utilizada en este proyecto.

En este marco, para la serie de datos se determinaron los estadígrafos de posición. En la tabla 1, se entrega la información pluviométrica de la estación a trabajar, donde los valores de los estadígrafos de la media y desviación estándar necesarios para comenzar a ajustar la función, fueron 651,67 y 228,82, respectivamente.

Ya con el resultado de los estadísticos media y desviación estándar calculados, se procede a ajustar la serie anual de precipitaciones anteriormente presentada. Para esto, es preciso determinar los parámetros de la función de Gumbel.

Determinación de parámetros d y μ :

$$d = \frac{1}{0,779696 \cdot 228,82} = \mathbf{0,0056}; \mu = 651,67 - 0,450047 \cdot 228,82 = \mathbf{548,6939}$$

Una vez determinados los parámetros de Gumbel, ya se tiene una primera aproximación del ajuste de la función. Sin embargo, se debe verificar si dicho ajuste es de calidad. Para ello, primero se debe ordenar la variable aleatoria en forma creciente y posteriormente se debe determinar la frecuencia observada acumulada $F_n(x)$ y la frecuencia teórica acumulada $F(x)$, así como la diferencia entre ambas variables. Todo aquello con el fin de buscar el máximo valor de las diferencias entre los valores observados y teóricos, el cual se remarca en la columna 6 de la tabla 1.

Tabla 1. Ejemplo para el ajuste de la FDP de Gumbel con datos de precipitación anual (mm) de la estación Huilliborgoa, San Rafael.

	Precipitación anual (mm)	Estación Huilliborgoa		Frecuencia teórica acumulada (FDP Gumbel)	Diferencia (Fn(X)-F(X))
		Precipitación ordenada de manera creciente	Frecuencia observada acumulada (FDP Weibull)		
1992	261,50	242,40	0,0435	0,0038	0,0397
1993	583,10	261,50	0,0870	0,0067	0,0802
1994	433,90	433,90	0,1304	0,1491	0,0187
1995	628,90	440,90	0,1739	0,1604	0,0135
1996	440,90	460,50	0,2174	0,1941	0,0233
1997	1026,40	490,50	0,2609	0,2502	0,0107
1998	242,40	536,10	0,3043	0,3419	0,0376
1999	768,60	546,10	0,3478	0,3625	0,0147
2000	770,80	583,10	0,3913	0,4384	0,0471
2001	946,90	584,90	0,4348	0,4421	0,0073
2002	1055,30	601,50	0,4783	0,4753	0,0030
2003	645,90	628,90	0,5217	0,5284	0,0067
2004	663,20	645,90	0,5652	0,5599	0,0053
2005	955,00	663,20	0,6087	0,5908	0,0179
2006	876,40	768,60	0,6522	0,7471	0,0949
2007	460,50	770,80	0,6957	0,7498	0,0541
2008	818,00	818,00	0,7391	0,8017	0,0626
2009	601,50	876,40	0,7826	0,8527	0,0701
2010	536,10	946,90	0,8261	0,8982	0,0722
2011	546,10	955,00	0,8696	0,9025	0,0330
2012	584,90	1026,40	0,9130	0,9336	0,0205
2013	490,50	1055,30	0,9565	0,9432	0,0133

Una vez obtenido el valor del supremo de las diferencias (en la posición n=15), éste se compara con el valor de la tabla Kolmogorov-Smirnov. Si el valor obtenido de la tabla K-S (Dt) es mayor que el supremo de las diferencias (Dc), se puede aceptar la hipótesis nula (Ho) que indicaría que se está en presencia de un buen ajuste con el nivel de confianza asumido (Dt > Dc) (Tabla 2)

Tabla 3. Resultados test de bondad del ajuste Gumbel

FDP Ajustada	Dc	Dt0,95	Ajuste K-S
Gumbel	0,0949	0,2809	Acepta Ho

Por otra parte, el Coeficiente de Determinación (R²) alcanza un 97,93%, lo que también indica un buen ajuste del modelo. Por esto se puede indicar que la FDP Gumbel es una distribución que se ajusta bien a los datos de precipitación presentados en el ejemplo.

La forma en que el el R² fue calculado fue la siguiente:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_1^{22} ((0,0038-0,0435)^2 + (0,0067-0,0870)^2 + \dots)}{\sum_1^{22} ((0,0038-0,5151)^2 + (0,0067-0,5151)^2 + \dots)} = 97,93\%$$

5.2.3. Coeficiente de escorrentía

No toda la lluvia que cae en un área determinada puede ser capturada y almacenada, debido a pérdidas por infiltración, evaporación y el tipo de suelo. Así, se define al coeficiente de escorrentía como la proporción del agua precipitada que escurre superficialmente. Por ende, en un sistema de captación de aguas lluvias, el ideal es que ese coeficiente sea lo más cercano al valor 1, con el fin de propiciar la mayor tasa posible de captura del agua caída. De ahí la relevancia de considerar este aspecto en la construcción del sistema, toda vez que dependiendo del tipo de material utilizado en el área de captación, será posible una mayor o menor captura del agua precipitada.

En función de lo anterior, y teniendo en consideración este fenómeno, en la tabla 3 se presentan valores de eficiencia del escurrimiento del agua en base a distintos materiales y coberturas de suelo.

Tabla 3. Coeficientes de escorrentía típicos.

Tipo de superficie	Coeficiente de escorrentía
Pavimentos de hormigón y bituminosos	0,70 a 0,95
Para superficies lisas, impermeables como techos en metal, en teja asfáltica, de concreto, entre otros.	0,90
Pavimentos de macadam	0,25 a 0,60
Adoquinados	0,50 a 0,70
Superficie de grava	0,15 a 0,30
Zonas arboladas y bosque	0,10 a 0,20
Zonas con vegetación densa: Terrenos granulares Terrenos arcillosos	0,05 a 0,35 0,15 a 0,50
Zonas con vegetación media: Terrenos granulares Terrenos arcillosos	0,10 a 0,50 0,30 a 0,75
Tierra sin vegetación	0,20 a 0,80
Zonas cultivadas	0,20 a 0,40

Fuente: Salinas, A., 2010.

El coeficiente de escorrentía depende de factores tales como el tipo de precipitación (lluvia, nieve o granizo); la cantidad, intensidad y distribución de la misma en el tiempo; la humedad inicial del suelo; del tipo de terreno (granulometría, textura, estructura, materia orgánica, grado de compactación, pendiente y rugosidad) y el tipo de vegetación existente, entre otras.

El coeficiente de escorrentía es muy importante para determinar el caudal que podrá ofrecer una determinada área de drenaje. Esta área será la que captará el agua de lluvia cuando precipita sobre ella, y la conduce posteriormente hacia un punto común de salida. Esta agua es la que abastece el estanque de acumulación, por lo tanto, el área de drenaje debe ser del tamaño suficiente para abastecer el volumen necesario durante el período de uso.

En términos generales, el coeficiente de escorrentía C se determina de acuerdo a la cobertura de la cuenca. Para zonas con vegetación se toma un valor de C=0,30 y para zonas impermeables C=0,90. Pero en este caso, la cuenca aportante al sistema es el área de captación impermeable, ya sea con hormigón o con geomembrana. Estos materiales poseen coeficientes de escorrentía que pueden alcanzar valores de 0,9-1,0 para los SCALLs construidos en geomembrana y cercano a 0,85 en el caso del hormigón armado revestido con algún producto impermeabilizante; sin embargo, en las unidades demostrativas se llegó a valores menores (tabla 4), debido a la utilización de las aguas por parte de los propietarios o al rellenado de los estanques de acumulación desde otras fuentes de agua, sin previo aviso antes de las fechas de medición.

Tabla 4. Valores del Coeficiente de Escorrentía obtenidos desde las unidades muestrales.

Materialidad	Fecha de medición	Coef. de escorrentía (C)	Valor C promedio
Hormigón	07 de julio 2015	0,48	0,53
	19 de agosto 2015	0,63	
	07 de octubre 2015	0,48	
Geomembrana	07 de julio 2015	0,84	0,80
	19 de agosto 2015	0,76	
	07 de octubre 2015	0,79	

No obstante, lo que queda claro es que la geomembrana es más eficiente que el hormigón en función del coeficiente de escorrentía obtenido.

5.3. Diseño Hidrológico de las Obras del Sistema de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias

Este sistema consta de tres partes principales:

5.3.1. Área de captación

Esta parte de la estructura debe ubicarse idealmente en una ladera desprovista de vegetación, donde cumple la función de capturar el agua proveniente de la lluvia. Para ello, esta área se impermeabilizará y sus dimensiones dependerán de la precipitación de diseño, del coeficiente de escorrentía asociado al material impermeabilizador (geomembrana u hormigón) y del volumen de agua que se quiera almacenar. Esto se resume en la siguiente expresión:

$$A_{cap} = \frac{V_c}{(P * C)}$$

Donde:

A_{cap} = Área de captación en la ladera (m²).

V_c = Volumen de la cisterna y/o volumen a capturar por año (m³).

P = Precipitación de diseño (m), calculada para una probabilidad de excedencia determinada.

En este caso P(x>X)=0,9.

C = Coeficiente de escorrentía, que dependerá del material con que se impermeabilice la ladera.

5.3.2. Sistema de conducción

Como su nombre lo indica, conduce por diferencia de gravedad el agua captada desde la superficie impermeabilizada hasta la cisterna de acumulación. Puede incluirse un sistema de decantación de sedimentos con el objetivo de almacenar agua más limpia. En este sentido, existen métodos artesanales simples, como colocar en la boca del tubo conductor una rejilla plástica, que filtra e impide la entrada de sedimentos al estanque acumulador. En ocasiones el sistema deberá conducir con un gradiente negativo porque la cisterna se ubica bajo la cota de la casa y en ese caso, será necesario aplicar energía, para lo cual la solar obtenida en base a paneles fotovoltaicos es muy recomendable.

5.3.3. Cisterna de acumulación

Corresponde al depósito donde se almacena el agua y su volumen estará dado por la ecuación anterior. Este valor dependerá del objetivo para el cual se pretende construir la cisterna. Asimismo, la cisterna puede ser construida de diferentes materiales, entre los que se pueden mencionar:

- Estanque vertical de fibra de vidrio.
- Estanque vertical de polietileno.
- Estanque tipo Australiano.
- Hidroacumulador de PVC.
- Excavación impermeabilizada con geomembrana y techada.
- Excavación impermeabilizada con hormigón y techada.

En la figura 30 se muestra el esquema de un sistema de captación y acumulación de aguas lluvias de ladera.



Figura 30. Esquema general de un sistema de captación y acumulación de aguas lluvias en una ladera. En este caso se trata de la unidad demostrativa del sector Los Marcos, Comuna de Longaví, en donde la construcción del sistema de captación y acumulación se hizo en hormigón armado, para un volumen de acumulación de 30 m³ y un área de captación de 80 m².

5.4. Definición, Selección y Combinación de Materiales

En esta etapa se procedió a la búsqueda, elección y combinación de los materiales a ser utilizados en los distintos sitios para la construcción de los SCALLs, así como también de los materiales a ser utilizados en los sistemas de distribución de aguas, tanto para el consumo humano, como para el riego. El objetivo principal de esta etapa es determinar los materiales idóneos para la construcción desde el punto de vista de su calidad, inocuidad y los costos asociados, de manera de asegurar una calidad de agua óptima para los usos que se pretenden. En este sentido, para el área de captación es recomendable la geomembrana HD de 1 mm de espesor, por su bajo costo y por su eficiencia en el escurrimiento. Para la cisterna de acumulación, se recomiendan los mencionados en el punto 5.3.3., que pueden ser adquiridos en su gran mayoría en el mercado local chileno.

Algunos elementos importantes a considerar en la elección de los materiales de construcción, tanto del área de captación como para el área de acumulación, son la accesibilidad a los predios, la disponibilidad de mano de obra, la maquinaria disponible, la presencia de áridos y el volumen de acumulación, donde este último está directamente relacionado con las demandas de agua de cada familia o comunidad en donde se focalizarán los SCALLs. Por ejemplo, en lugares alejados de las rutas principales y donde el acceso resulta complicado, es recomendable impermeabilizar el área de captación con geomembrana y utilizar un tanque flexible de PVC, pues éstos tienen la ventaja de que pueden ser transportados en vehículos menores, abaratando los costos y riesgos de transporte asociados a vehículos de mayor envergadura.

5.5. Replanteo en Terreno

Una vez determinados los aspectos de ingeniería de detalle de las obras, previo al proceso de construcción, se realizó un trabajo de replanteo de las obras en terreno, con el objetivo de asegurar una correcta construcción de las mismas y verificar si los detalles de construcción se enmarcaban en los aspectos específicos que el terreno presentaba. Si esto no se concretó por alguna razón, se debió recurrir a correcciones de diseño, con la finalidad de asegurar la congruencia entre dicho diseño y las características específicas del sitio en donde tomarían lugar las obras. Esto implica que en el terreno se determinó el emplazamiento de las obras de la captación y de acumulación (cisternas) para poder verificar las pendientes adecuadas, las distancias necesarias, los obstáculos de terreno y todo lo necesario para la adecuada implementación.

Es preferible construir las cisternas en suelos de texturas arcillosas, que al compactarse adquieren cierta impermeabilidad y estabilidad. Sin embargo, si se emplean estanques que requieran bases de hormigón, pueden construirse en suelos de texturas francas. Los afloramientos de rocas, grava o arena, pueden causar problemas por la excesiva infiltración y por el debilitamiento de las estructuras y por esto deben evitarse en lo posible. En caso de no poderse hacer, es necesario recubrir con materiales impermeables y resistentes antes de construir el SCALLs. De todas maneras, se recomienda realizar análisis mecánicos del suelo, con el fin de evitar potenciales deslizamientos del terreno y de las obras y asegurar así una buena preparación del terreno.

Debe procurarse la ubicación más ventajosa de acuerdo con el uso del agua, para evitar la necesidad de bombeo. Si el estanque es para abastecer abrevaderos o riego, es ideal utilizar la gravedad para el transporte del agua; por ello y como se ha señalado, conviene ubicarlo en una zona elevada de la propiedad, pero con suficiente área de captación para llenarlo durante los meses de invierno.

En caso de querer utilizar un SCALLs cuya fuente de agua sea un techo, es conveniente ubicarlo cerca de la construcción para reducir costos en las tuberías de transporte del agua, además de incorporar rejillas y filtros para evitar el ingreso de hojarascas y otros objetos que pueden caer desde el techo. De igual forma, el SCALLs debe estar ubicado lo más cerca posible del lugar donde se utilizará el agua.

5.6. Etapas de Construcción

Las etapas de construcción de las obras son las siguientes:

5.6.1. Construcción del área de captación

a. Limpieza, trazado, movimiento de tierra y nivelado

- Trazado y Niveles: esta labor contempla una jornada/hombre y es necesaria la utilización de cal para trazar, además de estacas de madera para determinar los niveles de la zona en donde se emplazará el área de captación. Por lo general, se trata de evitar emplazar esta zona en lugares con mucha roca y troncos, sobre todo procurando que sea una zona despejada de vegetación mayor (Figura 31).
- Limpieza y escarpado: se puede realizar con pala, motosierra y en algunos casos con retroexcavadora, sobre todo en aquellos sitios en donde es necesario el retiro de grandes rocas y/o tocones (Figura 32).

- Movimiento de tierra: esta partida considera el movimiento de tierra con pala y en otros casos retroexcavadora o ambos sistemas, dependiendo de los volúmenes de tierra a movilizar, la disponibilidad de mano de obra en cada sector y la accesibilidad a cada sitio. El área que se requiere para lograr llenar la cisterna debe contar con al menos 3 ó 5% de pendiente para que sea posible el escurrimiento del agua. En este punto, se recomienda estandarizar las pendientes entre 10 y 20% para el área de captación. Esta área consiste en la zona donde toda el agua de lluvia se colecta hacia un punto común de salida y que será aprovechada para llenar la cisterna (Figuras 33 y 34).



Figura 31. Trazado.



Figura 32. Limpieza y escarpado.



Figura 33. Movimiento de tierra con retroexcavadora.



Figura 34. Movimiento de tierra con retro y pala.

b. Estructura de soporte del área de captación

Una vez limpia, escarpada y nivelada la zona en donde se emplazó la geomembrana, se debió proceder a ejecutar las distintas labores de construcción de la estructura de soporte. Para esto fue necesario el trabajo de carpintería y la utilización de herramientas de mano, tales como pala, chuzo y barreno (en algunos casos fue necesario por la dureza del terreno) (Figuras 35 y 36).

Materiales utilizados:

- Polines impregnados de 3”
- Listones impregnados de 2x3”
- Tubería PVC gris tipo sanitario.
- Pala.

- Chuzo.
- Barreno.
- Martillo.
- Serrucho.
- Clavos.

Es importante mencionar que se recomienda dar una profundidad de unos 40 cm bajo tierra a los polines impregnados y en aquellos sitios en donde la pendiente del terreno es mayor al 15%, se deberán enterrar a una profundidad de 60 cm, con un distanciamiento de 1 metro. Se le debe dar una altura a todo el perímetro de 30 cm y en la parte baja del área de captación se da gradualmente una altura de 70 cm. Esto se muestra en la figura 37, donde los polines de la parte baja son más altos que los de la parte alta, con el objetivo de garantizar que el escurrimiento del agua sea dirigido hacia el área de acumulación.

Asimismo, la cabeza de los polines impregnados se corona con listones de 2x3" impregnados, y para evitar que los cantos de estos listones dañen la geomembrana, se corona con un tubo de PVC sanitario gris de 110 mm, dividido en dos partes en dirección a su largo. Gracias a lo anterior, resulta una pieza que se instalará sobre la solera de madera impregnada que une los polines, como se muestra en la figura 38. Esta pieza hará que la geomembrana trabaje mecánicamente mejor a la dilatación y la contracción.



Figura 35. Trabajo de carpintería corte de los polines.



Figura 36. Trabajo de perforaciones con el barreno.



Figura 37. Estructura de soporte en polines impregnados enterrados.



Figura 38. Coronación de los listones con PVC y Zanja.

c. Compactado

El proceso de compactación consiste en la densificación del suelo a través de la eliminación del aire (eliminar los espacios vacíos), para lo que se requiere la aplicación de energía mecánica, mediante compactadoras de plancha. Por ejemplo, con una máquina placa compactadora de embriague normal Y con frecuencia de vibración de 6500 vpm, se asegura una compactación de 20 cm en doble pasada. De esta manera, se mejoran las condiciones de suelo y se aumenta entonces la capacidad de soporte y estabilidad. La labor de compactado del suelo es de suma importancia, dado que con ello se evita que la geomembrana se dañe con deformaciones agresivas del terreno y la presencia de objetos irregulares (punzantes).

d. Construcción del área de captación con geomembrana HDPE negra de 1mm: corte, fusionado, instalado y sellado de la geomembrana

Para el caso de la geomembrana negra lisa de HDPE de 1 mm de espesor, el fusionado se realiza con máquina soldadora de cuña caliente. Esta máquina trabaja y fusiona la geomembrana a una temperatura de 420°C. El sellado o soldadura de la geomembrana se hace a través de la extrusión con la máquina extrusora para cordón HDPE de 4 a 4,5 mm, la que define una extrusión de 6 Kg de cordón por hora.

Respecto del proceso mismo, es importante mencionar que se requieren condiciones óptimas de temperatura para el proceso de fusionado y sellado, ya que en condiciones de humedad no es posible llevar a cabo esta etapa. Es un proceso muy demandante de mano de obra y requiere de 2 a 3 días en su ejecución. Esto porque la Geomembrana HDPE de 1 mm frente a altas temperaturas verifica un trabajo a la dilatación, y a bajas temperaturas, registra un trabajo a la contracción. Después de este trabajo mecánico se puede realizar la extrusión, ya que la Geomembrana se ha moldeado a la estructura de captación.

Otra operación a considerar es la ejecución, en todo el perímetro del área de captación, de una zanja de 30 cm de profundidad, con el propósito de que el borde de la geomembrana se entierre en la zanja, para posteriormente tapar con material de la excavación y realizar un compactado final en todo este perímetro. De esta manera, se evita que quede expuesta la superficie o que queden espacios por donde pueda entrar el viento y genere un desplazamiento de todo el paño de la geomembrana. Esto se puede evidenciar en la figura 40.

Los materiales a utilizar en esta etapa son Geomembrana negra lisa de HD, con 1 mm de espesor, máquina de fusionado, máquina de sellado, soldadura para geo textil HD y cuchilla cartonera.



Figura 39. Corte de la geomembrana para su fusionado.



Figura 40. Fusionado de la Geomembrana.



Figura 41. Instalación de la geomembrana en la estructura de soporte del área de captación.



Figura 42. Sellado y soldado de la geomembrana.



Figura 43. Zanja perimetral en donde va enterrada la geomembrana.



Figura 44. Área de captación terminada.

e. Construcción del área de captación de hormigón

En el caso de considerarse un área de captación de hormigón armado, esta consistirá en la ejecución de un radier que se adecúe a la pendiente. El radier será de un espesor mínimo de 8 a 10 cm con una malla ACMA C-139 en la parte inferior o, en su defecto, una malla de fierro corrugado de 8 mm de diámetro. El hormigón a utilizar debe ser a lo menos un H-20 y se recomienda un pre mezclado para garantizar la calidad del mismo. En el caso que no existiese en un lugar cercano un proveedor de este material, se podrá construir el hormigón in situ cuidando las proporciones exactas para su elaboración. El hormigón debe ser vibrado en su totalidad por medio de una cercha vibradora de un ancho máximo, con el fin de garantizar una buena vibración. Para ello se recomienda hacer una terminación con una máquina alisadora de hormigón, llamado comúnmente alisado con helicóptero. Esto, para que el coeficiente de escorrentía sea lo más alto posible, teniendo como ideal el valor más cercano a 1. Pero en términos prácticos si se consiguen valores de 0,85, ello será adecuado.

Este captador debe llevar un borde en todo su perímetro, de a lo menos 30 cm de altura y construido también en hormigón.

5.6.2. Construcción del área de acumulación

El almacenamiento es el elemento más importante del sistema de captación y acumulación de aguas lluvias debido a su costo, pues representa el 80 a 90% del total del sistema. Su capacidad debe ser suficiente para el consumo diario de una familia, durante los períodos o meses críticos y sobre todo en períodos de sequía. Por supuesto, esto apunta al medio rural, donde el consumo por habitante/día en promedio, según lo descrito por la Superintendencia de Servicios Sanitarios, es de 100 litros para asegurar un consumo eficiente y responsable. Por tanto, en el cálculo del diseño se debe considerar que las cisternas de acumulación cuenten con un volumen que dependerá del número de personas integrantes del grupo familiar, del número y tipo de animales dentro de la unidad productiva y de sus cultivos.

En lo que se refiere a las materialidades utilizadas, se recomiendan la geomembrana de HDPE, hormigón armado, estanque Australiano, estanques de polietileno, estanques de fibra de vidrio e hidroacumuladores de PVC estático.

En cuanto a los requisitos exigidos para el almacenamiento de agua, se consideraron los siguientes:

- Tener suficiente resistencia estructural ante fenómenos naturales. Estos no deben permitir que pase la luz, además de evitar la entrada de polvo e insectos, pues la luz genera la aparición de algas y los insectos pueden encontrar un lugar apto para reproducirse.
- Tener un dispositivo de filtrado con el fin de evitar que muchas partículas entren al estanque, con su consecuente problema de acumulación en el fondo e inclusive, contaminación de aguas y obstrucción de tuberías. Para este caso, es suficiente contar con un filtro a base de grava, arena y carbón activado para obtener un agua apta para uso doméstico.
- Disponer de una válvula de entrada y salida del agua de lluvia.
- Tener un dispositivo de despiche con un dissipador de energía que permita eliminar el agua de excedencia y que en el proceso de limpieza, permita además el desagüe. Es necesario considerar la evacuación del exceso de aguas dentro del reservorio; de lo contrario, existe el riesgo del rebalse y, por lo tanto, de daño a la infraestructura.
- Que la cisterna de almacenamiento cuente con una tapa de acceso al interior, para la limpieza y reparaciones.

Lo más complejo de esta etapa es la construcción de las tapas de las cisternas de acumulación en geomembrana y hormigón armado, cuyas especificaciones técnicas muchas veces tienen que ser modificadas en virtud de sus dimensiones. Así se evita que las cisternas posean un peso excesivo y colapsen.

Las etapas de construcción del área de acumulación son muy similares a las del área de captación. Se debe contar con los procedimientos descritos anteriormente de limpieza, trazado y compactación. Para el caso que el sistema de acumulación sea una cisterna de geomembrana u hormigón, se debe contar con el movimiento de tierra y nivelado. Para el acumulador en geomembrana, se debe considerar tener un talud de inclinación de al menos 60°, dependiendo del tipo de suelo, para garantizar la estabilidad de la excavación.

El movimiento de tierra no es una actividad menor, ya que muchas veces y de acuerdo a las dimensiones y el volumen de acumulación, el movimiento de material puede necesitar el uso de maquinaria como una retroexcavadora.

En cuanto al nivelado de la base del estanque, este se puede lograr mediante equipos topográficos adecuados, como una estación total, de manera de lograr una superficie plana. En caso que no se tuviese una estación total, también es posible realizar la nivelación con el sistema de la manguera transparente con agua.

A continuación, se muestran algunas alternativas de los sistemas de acumulación.

a. Acumulación en Geomembrana

Es recomendable realizar, según el terreno donde se coloque la geomembrana, una buena compactación del

terreno a fin de no dañarla, considerando las recomendaciones referidas a la tapa del área de acumulación. Tales recomendaciones se indican en párrafos anteriores. En las siguientes figuras se muestra el proceso de instalación de un estanque de geomembrana.



Figura 45. Trabajos de maquinaria en el movimiento de tierra y excavación del área de acumulación.



Figura 46. Trabajos de maquinaria para el movimiento de tierra.



Figura 47. Área de acumulación.



Figura 48. Área de acumulación con cubierta en Geomembrana HD de 1 mm de espesor.

b. Acumulación de agua lluvia utilizando un hidroacumulador de PVC.

Para la utilización de un hidroacumulador Flexitank de PVC, se recomienda que el sector donde se instalará el Flexitank o hidroacumulador no deberá tener ningún tipo de pendiente y si deberá tener una base lisa bien compactada, con el fin de garantizar que, una vez lleno, el estanque no se deslice, trabaje de forma estable y acumule de buena forma. Esto también implica una buena nivelación y compactación del terreno donde se emplazará la cisterna. En las siguientes figuras se muestra el proceso para la instalación de un hidroacumulador.



Figura 49. Trazado zona de acumulación.



Figura 50. Limpieza del sitio demostrativo.



Figura 51. Parte del cerro que tiene que rebajarse para la zona de acumulación.



Figura 52. Movimiento de tierra con retroexcavadora.



Figura 53. Excavación con herramientas de mano.



Figura 54. Área donde se emplazará el hidroacumulador de PVC.



Figura 55. Instalación del hidroacumulador de PVC.



Figura 56. Hidroacumulador con agua.

c. Acumulación de agua lluvia utilizando un estanque vertical de polietileno y de fibra de vidrio.

Para la instalación del estanque de polietileno se debe ejecutar un radier de hormigón armado con un espesor mínimo de 8 a 10 cm, con una malla ACMA C-139 en la parte inferior o, en su defecto, una malla de fierro corrugado de diámetro 8 mm. El hormigón a utilizarse debe ser a lo menos un H-20.

Como se aprecia en las figuras siguientes, también se recomienda un buen nivelado y compactado del terreno. En casos como el que se muestra en la figura 60, es un inconveniente la presencia de rocas que podrían dificultar la compactación.



Figura 57. Limpieza del terreno.



Figura 58. Trazado del área de acumulación.



Figura 59. Movimiento de tierra.



Figura 60. Presencia de grandes rocas extraídas con la retroexcavadora.



Figura 61. Excavación área de acumulación.



Figura 62. Radier en donde se emplazará el estanque de polietileno.

d. Acumulación de agua lluvia utilizando un estanque fabricado de hormigón armado

En este caso, es importante verificar la dosificación del hormigón, de tal manera que se permita una buena impermeabilización del estanque. Al ser el hormigón un material poroso por excelencia, es importante impermeabilizar el estanque, por dentro y por fuera. Para ello se debe considerar una capa exterior de mortero de cemento, incorporando, por ejemplo, Sika -1 en el agua. Además, exteriormente, se debe considerar el pintado con alguna pintura epóxica que garantice la impermeabilización (por ejemplo Igol). El hormigón deberá ser mínimo un H-25 (18 palas de grava, 10 palas de arena, 13/4 baldes de agua de 10 litros). El espesor de muros y radier base, deberá ser al menos de 15 cm, con refuerzos de varillas corrugadas formando una malla doble de 12 c/ 15 cm.

Una vez hecha la excavación, deberá instalarse el moldaje de madera en el interior de la excavación a 15 cm de la pared del acumulador. Cabe recordar que en este tipo de acumulador las paredes no llevan talud, por lo tanto, la terminación de las paredes es en ángulo recto. Posterior a esto, se colocarán mallas dobles tipo c-139 como estructura de la pared, y una vez instaladas se deberá rellenar con hormigón H-25 a contra muro, dejando una terminación en su parte superior y por todo el perímetro en un muro de 20 cm de altura por 30 cm de ancho. Este muro soportará como base a la estructura de la techumbre, que irá amarrada con una solera inferior. En las siguientes figuras se muestra el proceso para la instalación de un estanque de hormigón armado.



Figura 63. Zona en donde se emplazará la unidad demostrativa.



Figura 64. Movimiento de tierra y excavación de la zona de acumulación.



Figura 65. Enfierradura con malla Acma C- 139.



Figura 66. Trabajos de carpintería de moldaje para recibir el hormigón.



Figura 67. Instalación de moldajes.



Figura 68. Hormigonado del área de acumulación.

5.6.3. Sistema de conducción

El agua de lluvia recolectada en el área de captación se conduce hacia la zona de acumulación mediante tuberías de HDPE en 110 mm, para garantizar la salida adecuada del agua lluvia y permitir que no se acumule en el captador. Esta tubería deberá ir enterrada para evitar manipulaciones de terceros. Puede incluirse un sistema de decantación de sedimentos con el objetivo de almacenar agua más limpia. En este sentido, existen métodos artesanales simples, como colocar en la boca del tubo conductor una rejilla plástica, que filtra e impide la entrada de sedimentos al estanque acumulador.



Figura 69. Instalación del sistema de conducción.

Figura 70. Rejilla plástica como filtro sencillo.

5.6.4. Cierre perimetral

La instalación del cierre perimetral debe hacerse por lo menos a 1 m de distancia del perímetro del captador y acumulador de aguas lluvias, para poder transitar por el sector sin ningún problema, facilitar las mantenciones de la obra y evitar el ingreso de animales al recinto.

Para el cierre perimetral, debe considerarse la instalación de polines de madera impregnada de 3" a 4" pulgadas, enterradas a 40 cm de profundidad y a una distancia de 2,5 m como máximo. La malla debe ser galvanizada de 1 m de altura (por ejemplo, Inchalam modelo 5014), instalada con grampas galvanizadas, que deben ser por lo menos de 1" a 1 ½ "pulgadas. El cerco perimetral debe tener por lo menos 3 hebras de alambre de púas galvanizadas por sobre la malla. Finalmente, se debe considerar tener una puerta de acceso la que puede ser confeccionada con madera impregnada de 2" x 2" pulgadas, con la misma malla galvanizada y con una cerradura sencilla (Figuras 71 y 72).



Figura 71. Cierre perimetral.

Figura 72. Puerta de acceso.

6.- DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO FOTOVOLTAICO.

La justificación de utilizar ERNC en un SCALLs son similares a las de utilizar ERNC en otros sistemas de riego y/o sistema de agua potable rural (Jones & Hunt, 2010). Ello, porque el sector donde se emplaza el SCALLs normalmente se ubica por bajo la cota del lugar donde será utilizada el agua, a lo que se suma que no tiene normalmente suministro eléctrico, o el suministro eléctrico es inestable o (b) el tamaño del SCALLs es significativo y los requerimientos de bombeo justifican complementar la energía que viene desde la RED.

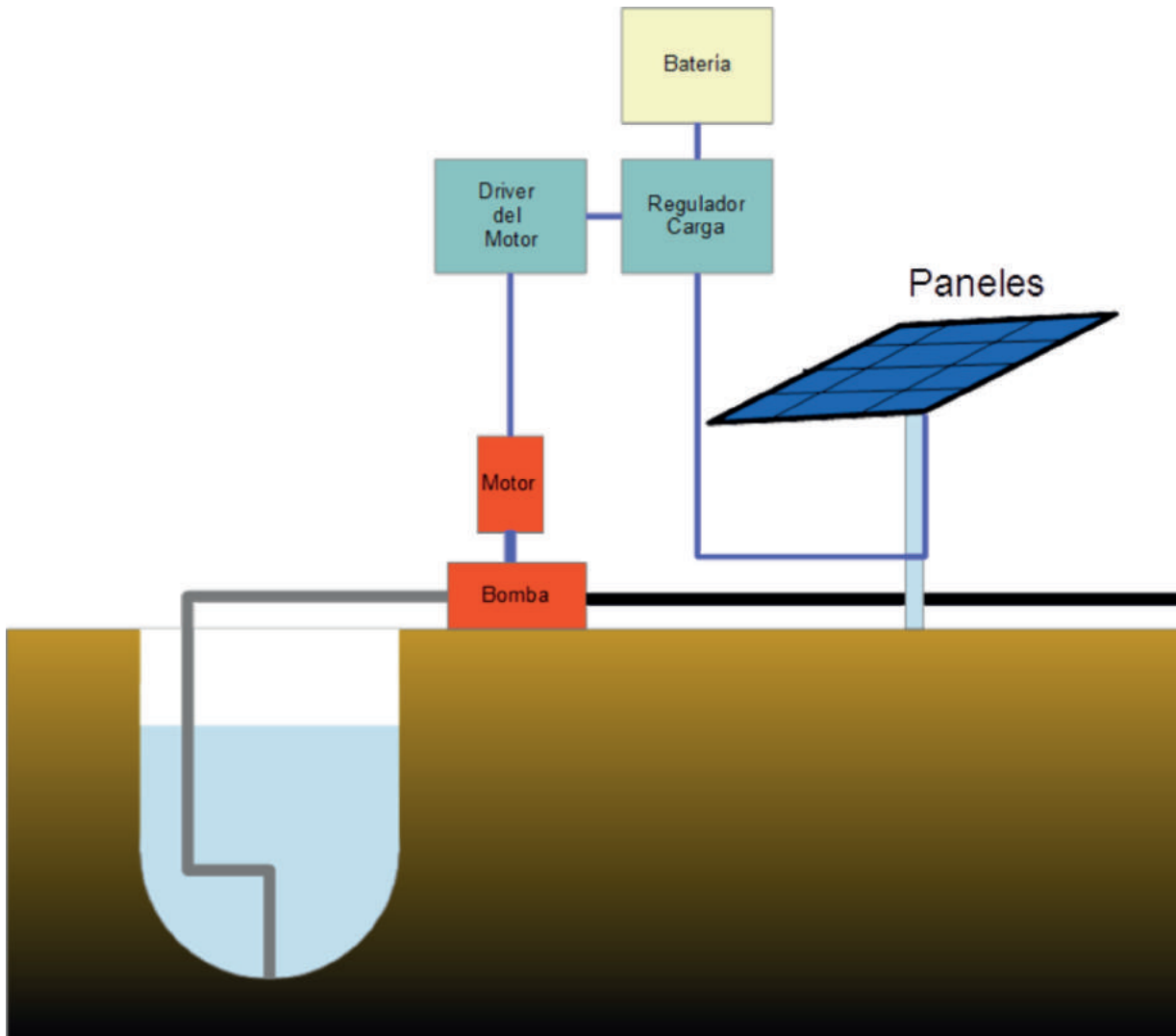


Figura 73: Sistema de bombeo fotovoltaico ON-Grid genérico.



Figura 74: planta fotovoltaica del sistema de captación sector Los Molinos, Curepto.



Figura 75: planta fotovoltaica del sistema de captación sector El Huapi, Licantén.

6.1. Partes constituyentes de un sistema de riego fotovoltaico off grid

Un sistema de bombeo fotovoltaico OFF GRID está constituido por:

- (a) **Paneles solares:** elementos que al recibir energía radiante del sol, generan energía eléctrica.
- (b) **Bomba eléctrica:** máquina electromecánica compuesta a lo menos por un motor y una bomba mecánica. En el caso de sistemas diseñados para operar con sistemas fotovoltaicos, existen modelos que operan con conexión directa a los paneles, aunque hay otros que requieren un driver y algunos que pueden operar en los dos modos anteriores.
- (c) **Regulador de Carga:** equipo opcional que permite estabilizar el voltaje DC en la salida, cargar baterías, operar desde las baterías y optimizar el aprovechamiento de la potencia entregada por los paneles. Esto último si y solo si se cuenta con un algoritmo de seguimiento del punto de potencia máxima (en inglés Maximum Power Point tracking MPPT).
- (d) **Driver del motor:** elemento de control que permite cambiar la velocidad de la bomba, adaptándose al voltaje de entrada y/o a los requerimientos de riego. Usualmente se vende como controlador de la bomba. Constructivamente hay de varios tipos, utilizando convertidores DC/DC para motores de corriente continua, inversores trifásicos integrados para motores sincrónicos de imanes permanentes, comercializados como “DC brushless motors”, e inversores de señal cuasi sinusoidal para su uso con motores estándar de bajo costo.

6.2. Sistemas fotovoltaicos para su uso en SCALLs

Las metodologías útiles en el diseño de un sistema fotovoltaico y para su uso en SCALLs son las mismas que para cualquier sistema de bombeo. El procedimiento que acá se presenta es válido para bombas que requieren mover un caudal diario y que pueden trabajar en un rango variable de voltajes de alimentación, pues este fue el tipo de bomba utilizada en los sistemas de los SCALLs.

El diseño fotovoltaico parte cuando se reciben las especificaciones de la bomba de parte de quien define las necesidades de riego o de suministro de agua para consumo doméstico. Datos importantes son los voltajes máximos y mínimos de operación, la potencia máxima, las curvas características de caudal-potencia y el caudal diario requerido mes a mes.

Con estos datos se debe encontrar la combinación de número de paneles y su configuración. En general se selecciona como primera aproximación un modelo de panel solar cuyo voltaje pack sea fracción del voltaje máximo de la bomba y que la potencia máxima del arreglo sea algo mayor a la potencia de la bomba.

Para abordar esta problemática, se presentan los siguientes pasos a seguir como marco de acción:

Paso I.

Se calcula para cada mes la energía $E_{pv,k}$ diario promedio producida por un único panel de potencia punta P_{pk} , en función de las horas estándar equivalentes promedio para el k -ésimo mes $H_{s,k}$ o de datos tabulados en forma directa, por mediciones o cálculos disponibles al público general.

$$E_{pv,k} = H_{s,k} * P_{pk} \quad (1)$$

Paso II.

Se lleva a cabo el cálculo de los requerimientos energéticos mensuales en función de la potencia de la bomba P_p y del tiempo que debe operar en el k -ésimo mes $h_{om,k}$, a la potencia punta para mover el volumen de agua requerido o se obtiene directamente de datos de requerimientos de energía entregados por los profesionales de riego.

$$E_{elect,k} = P_p * h_{om,k} \quad (2)$$

Paso III.

Se calcula en número de paneles para el peor caso, es decir, se calcula mes a mes el cuociente entre la energía que requiere el bombeo y la energía que entrega un panel; para ello se escoge el mayor número aproximado al entero superior.

$$N_p = \max \left(\left(\frac{E_{elect,k}}{E_{pv,k}} \right) \right) \quad (3)$$

Paso IV.

Se revisa que el arreglo cumpla con las restricciones de voltajes para los meses con mayor y menor radiación solar. Si no es posible encontrar un arreglo en serie paralelo que cumpla ambos requisitos, se debe seleccionar otro modelo compatible con el sistema y repetir el análisis.

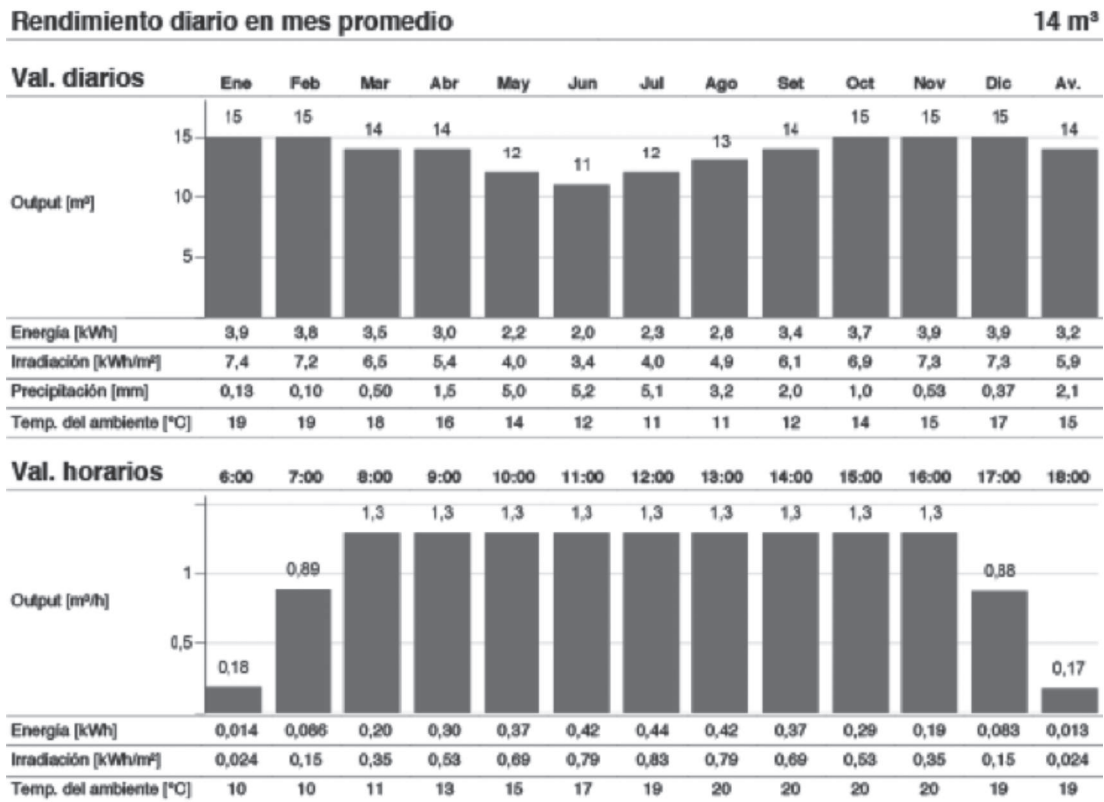
6.3. Rendimientos energéticos de las unidades.

6.3.1. Los Molinos – Curepto

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 3 paneles solares KYOCERA de 190Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 570Wp.

El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un Flexitank, por lo que en esta unidad se instalo el sensor de funcionamiento en seco inserto en la tubería.

Rendimientos aproximados de la unidad:



6.3.2. Rapilermo Alto – Curepto

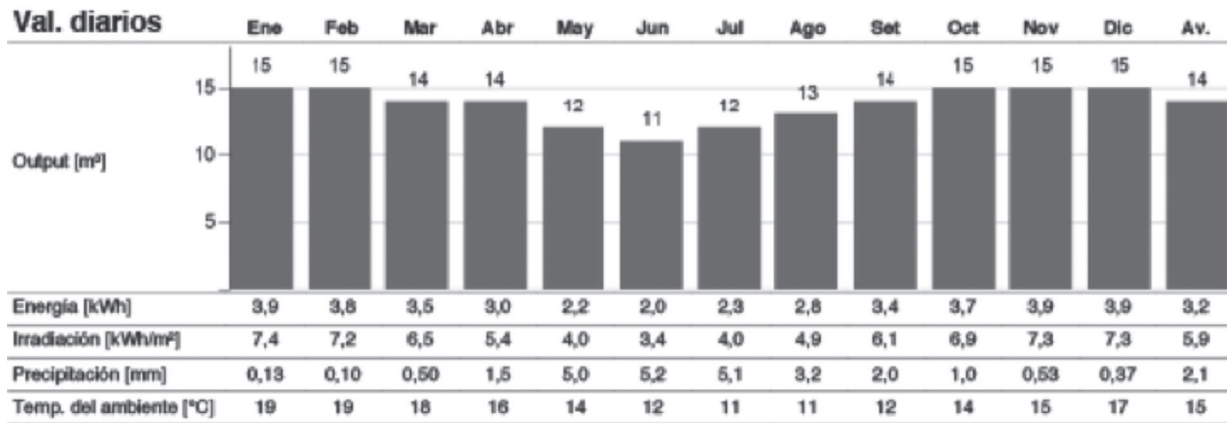
Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 2 paneles solares SCHOOT PERFORM de 245Wp policristalinos, con una potencia total instalada de 490Wp.

El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un estanque de geomembrana plástica, utilizando en el interior del estaque un Switch de corte por nivel, válvula de pie con malla de filtro.

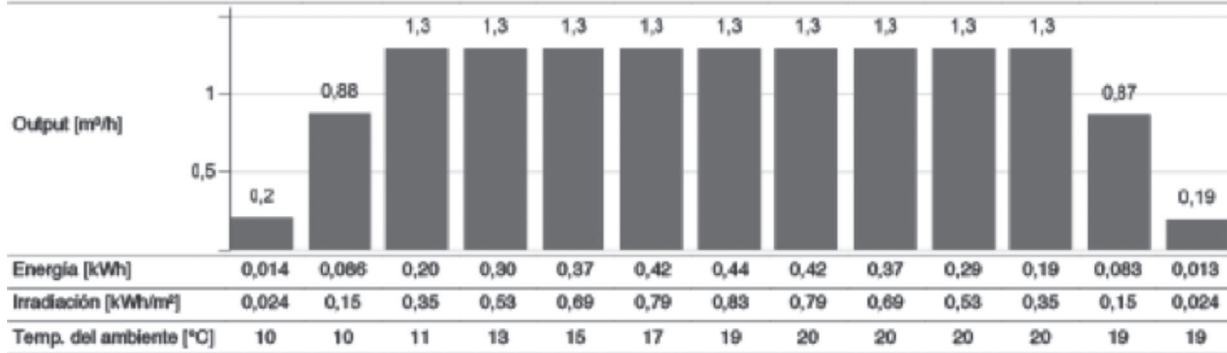
Rendimientos aproximados de la unidad:

Rendimiento diario en mes promedio

14 m³



Val. horarios



6.3.3. Los Guindos – Curepto

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 2 paneles solares Hareon Solar de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 400Wp.

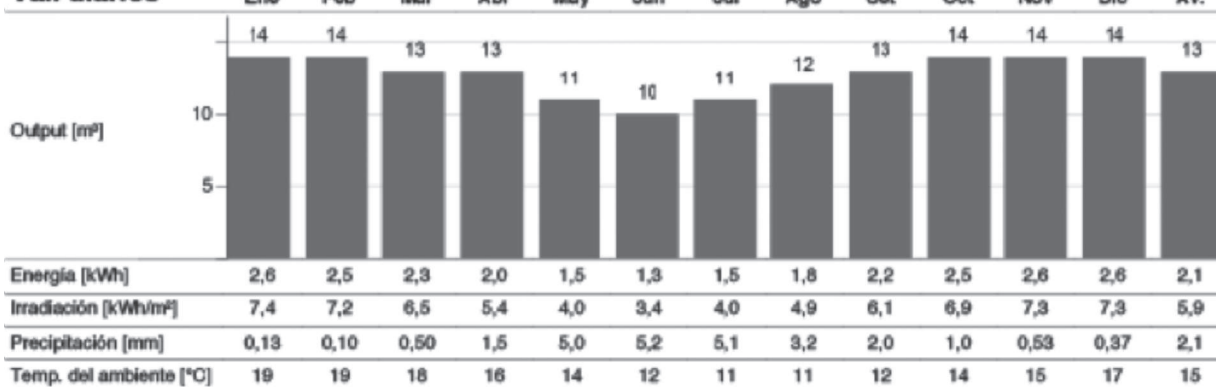
El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un Flexitank, por lo que en esta unidad se instalo el sensor de funcionamiento en seco inserto en la tubería.

Rendimientos aproximados de la unidad:

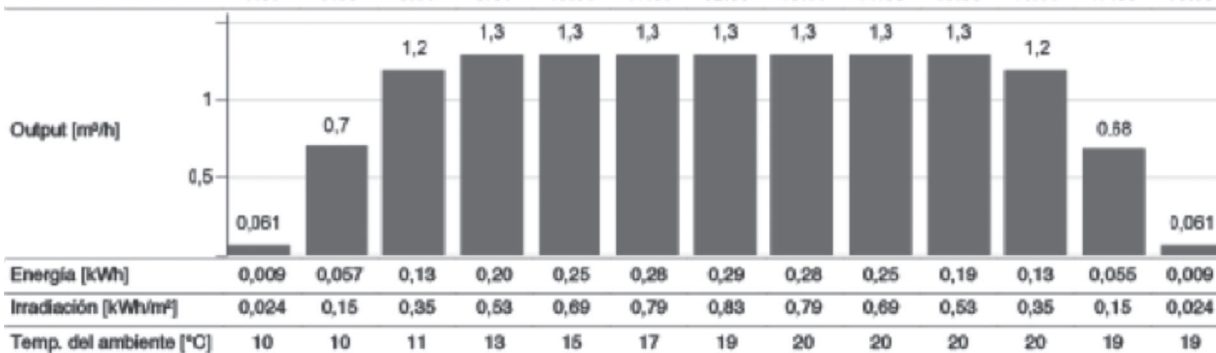
Rendimiento diario en mes promedio

13 m³

Val. diarios



Val. horarios



6.3.4. La Leonera – Licantén

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 2 paneles solares RISEN de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 400Wp.

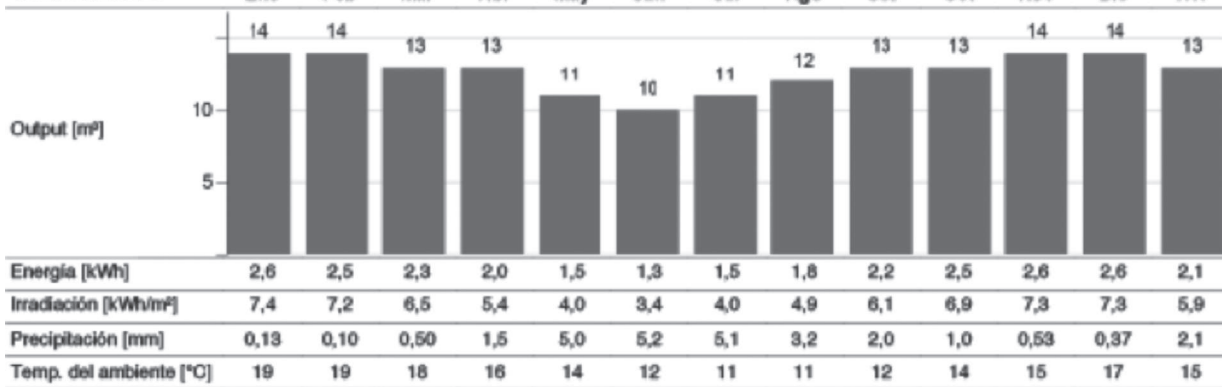
El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un estanque plástico, utilizando en el interior del estanque un Switch de corte por nivel.

Rendimientos aproximados de la unidad:

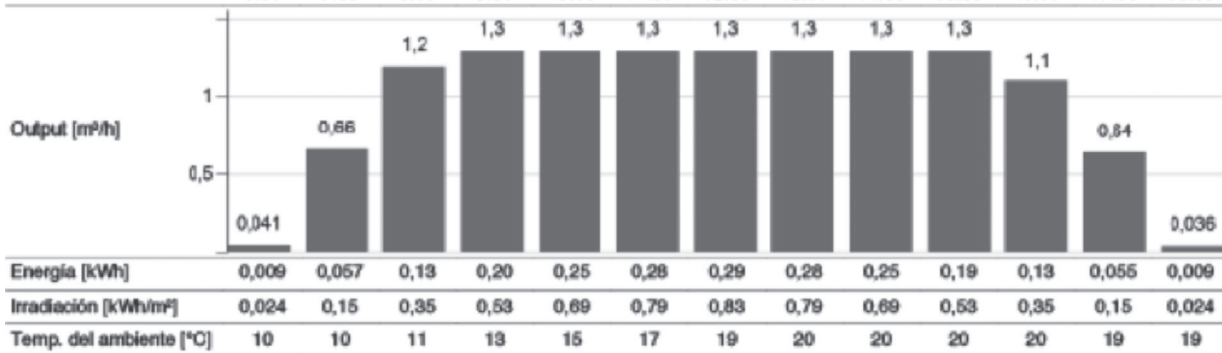
Rendimiento diario en mes promedio

13 m³

Val. diarios



Val. horarios



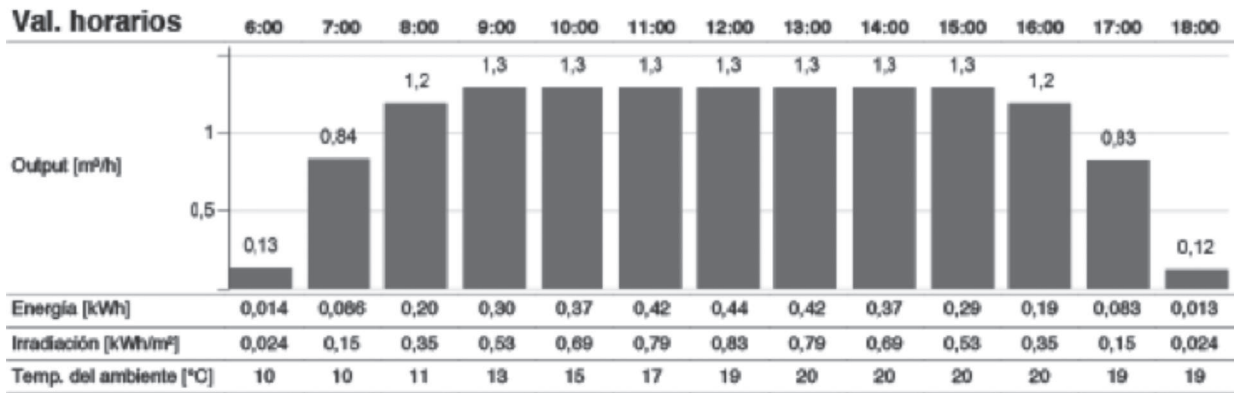
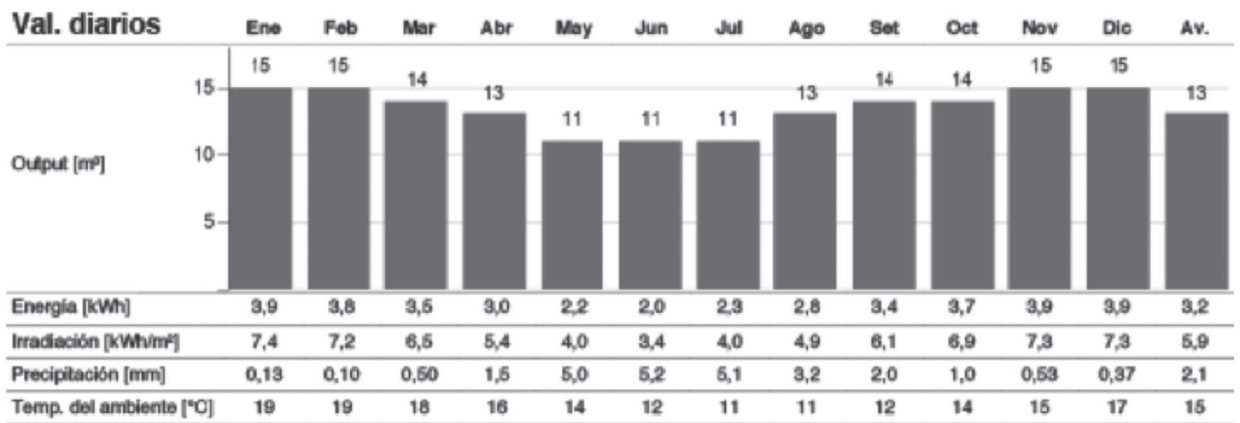
6.3.5. El Huapi – Licantén

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 3 paneles solares RISEN de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 600Wp.

El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un estanque de geomembrana plástica, utilizando en el interior del estaque un Switch de corte por nivel, válvula de pie con malla de filtro.

Rendimientos aproximados de la unidad:

Rendimiento diario en mes promedio 13 m³



6.3.6. Los Marcos – Longaví

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 2 paneles solares RISEN de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 400Wp.

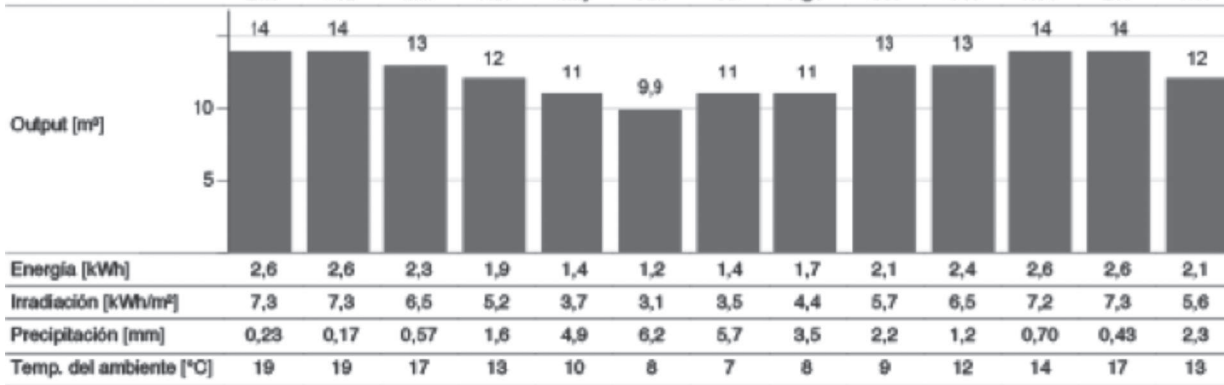
El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un estanque de Hormigón, utilizando en el interior del estaque un Switch de corte por nivel, válvula de pie con malla de filtro.

Rendimientos aproximados de la unidad:

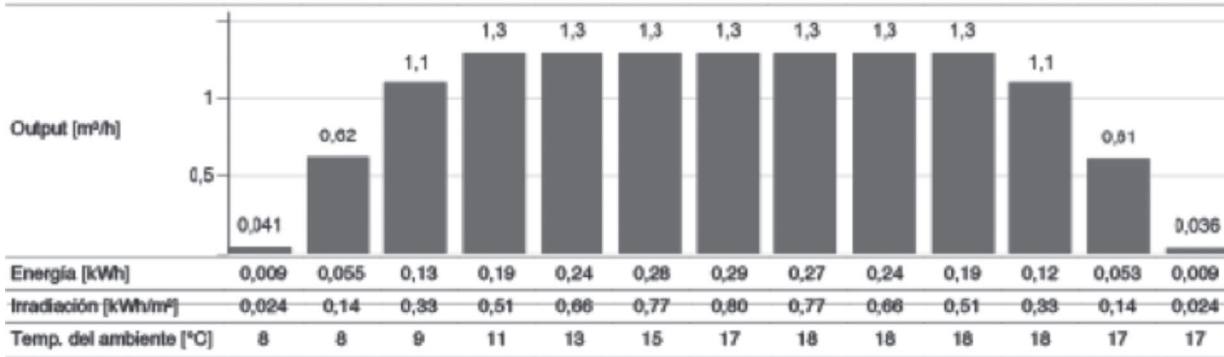
Rendimiento diario en mes promedio

12 m³

Val. diarios



Val. horarios



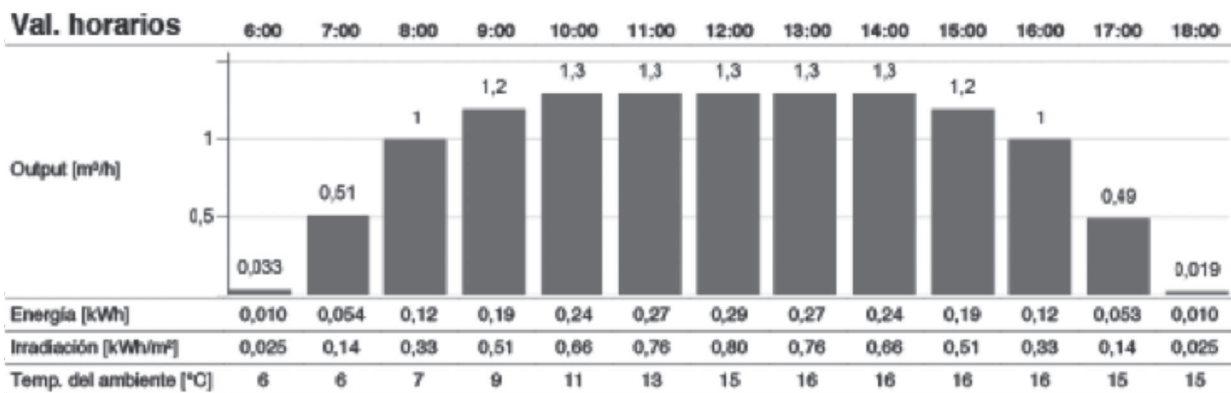
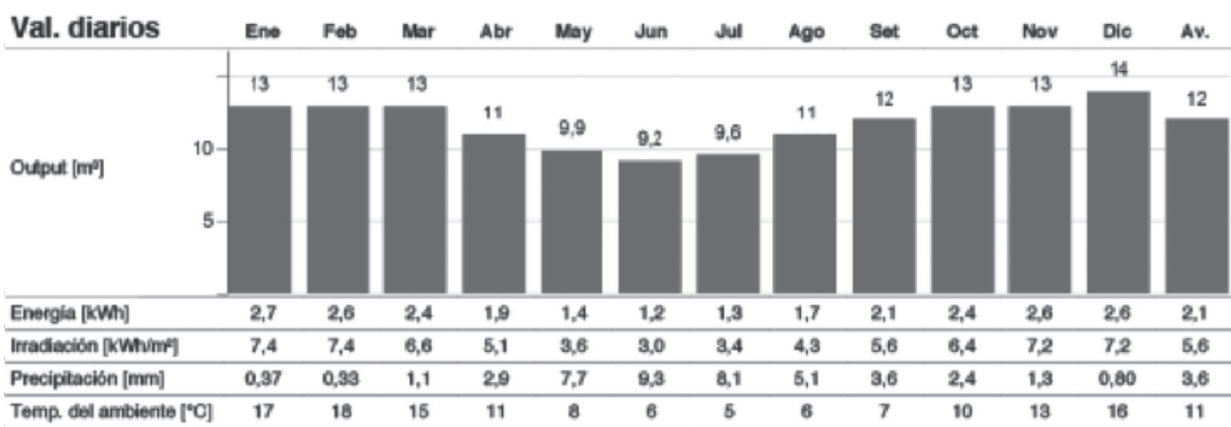
6.3.7. Loma de Vásquez- Longaví

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 2 paneles solares Hareon Solar de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 400Wp.

El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un Flexitank, por lo que en esta unidad se instalo el sensor de funcionamiento en seco inserto en la tubería.

Rendimientos aproximados de la unidad:

Rendimiento diario en mes promedio 12 m³



6.3.8. Ramadilla – Pelluhue

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 2 paneles solares RISEN de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 400Wp.

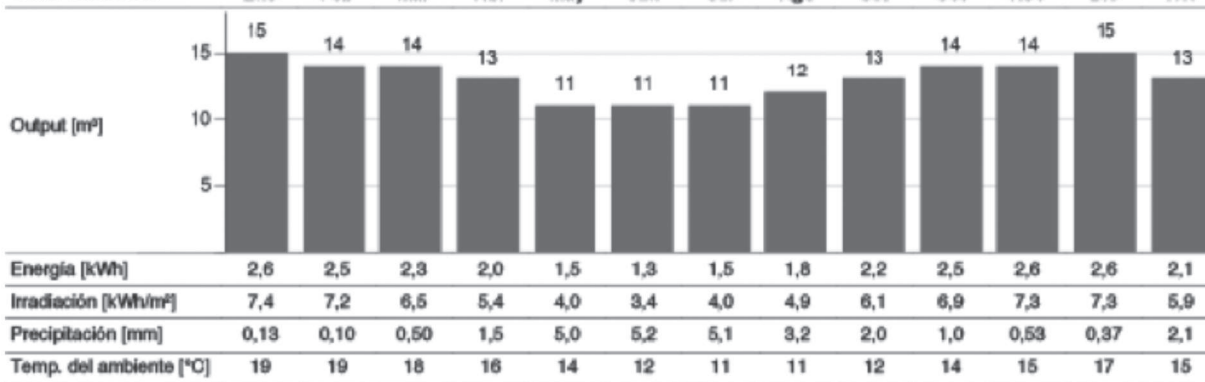
El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un estanque de fibra de vidrio, utilizando en el interior del estaque un Switch de corte por nivel y en la salida una válvula antirretorno.

Rendimientos aproximados de la unidad:

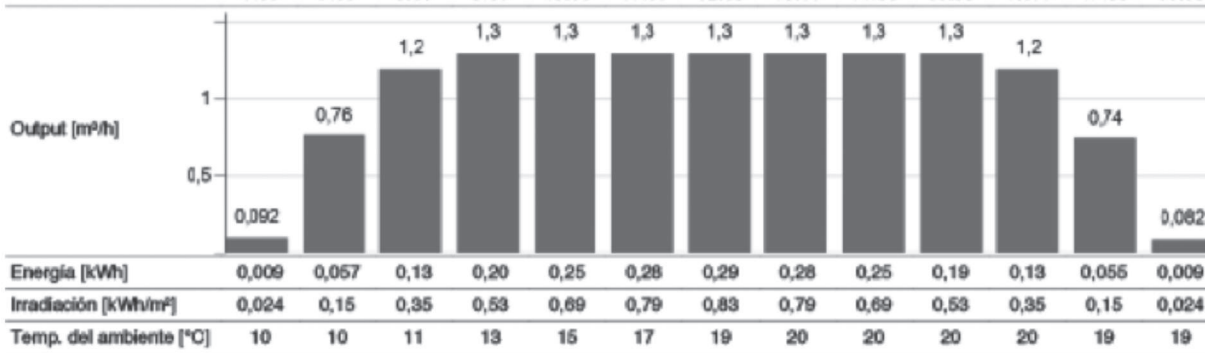
Rendimiento diario en mes promedio

13 m³

Val. diarios



Val. horarios



6.3.9. Peñu Alto – Pelluhue

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 3 paneles solares RISEN de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 600Wp.

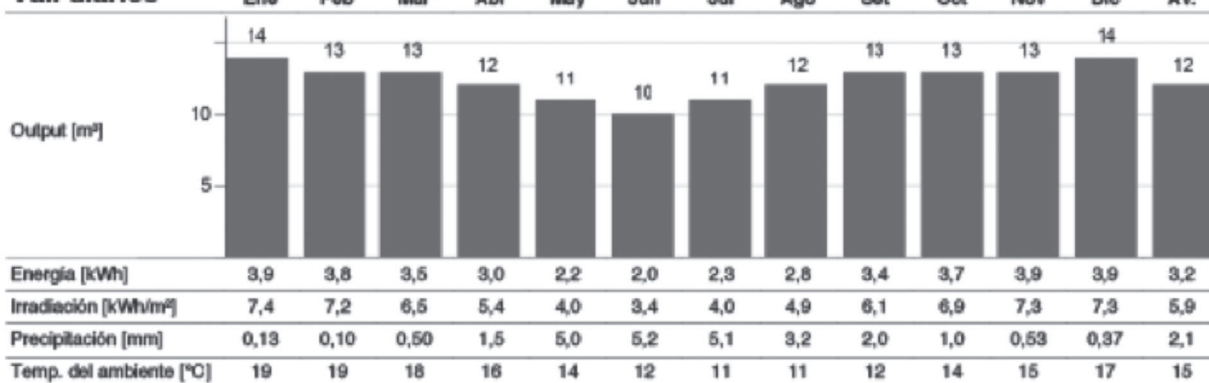
El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un estanque tipo australiano, utilizando en el interior del estaque un Switch de corte por nivel y válvula de pie con rejilla de filtro.

Rendimientos aproximados de la unidad:

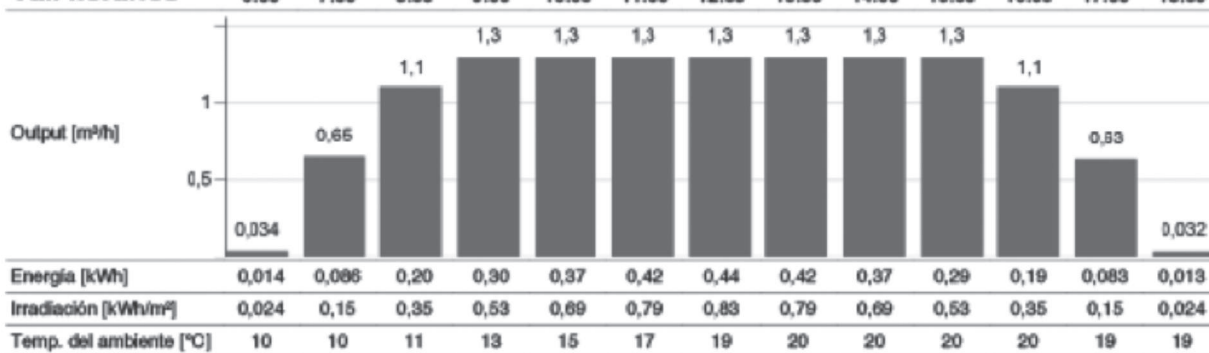
Rendimiento diario en mes promedio

12 m³

Val. diarios



Val. horarios



6.3.10. Lagunillas – Chanco

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 3 paneles solares Hareon Solar de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 600Wp.

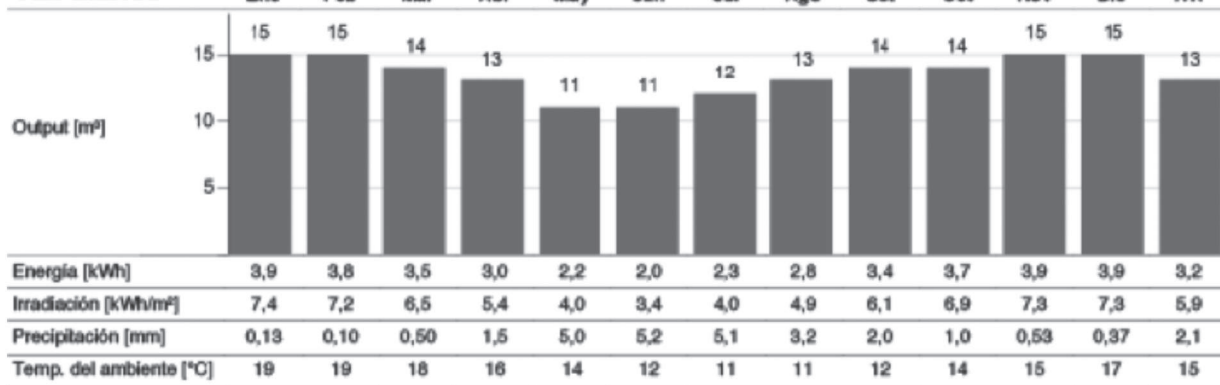
El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un Flexitank, por lo que en esta unidad se instalo el sensor de funcionamiento en seco inserto en la tubería.

Rendimientos aproximados de la unidad:

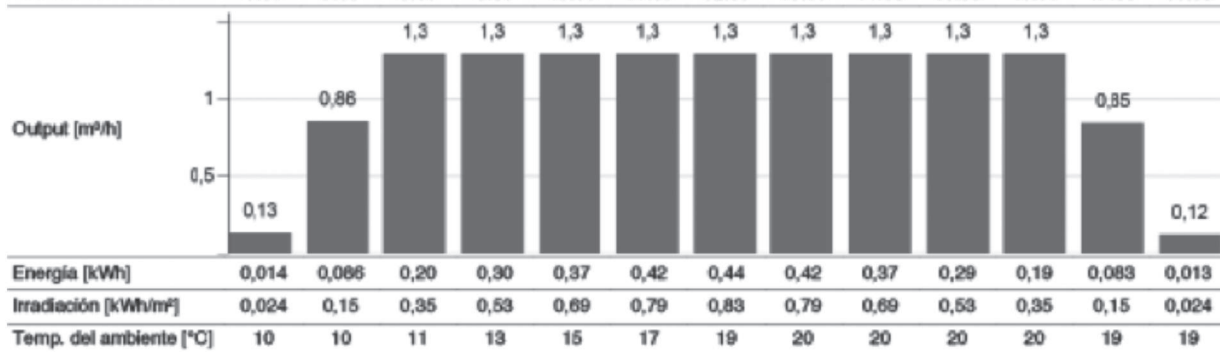
Rendimiento diario en mes promedio

13 m³

Val. diarios



Val. horarios



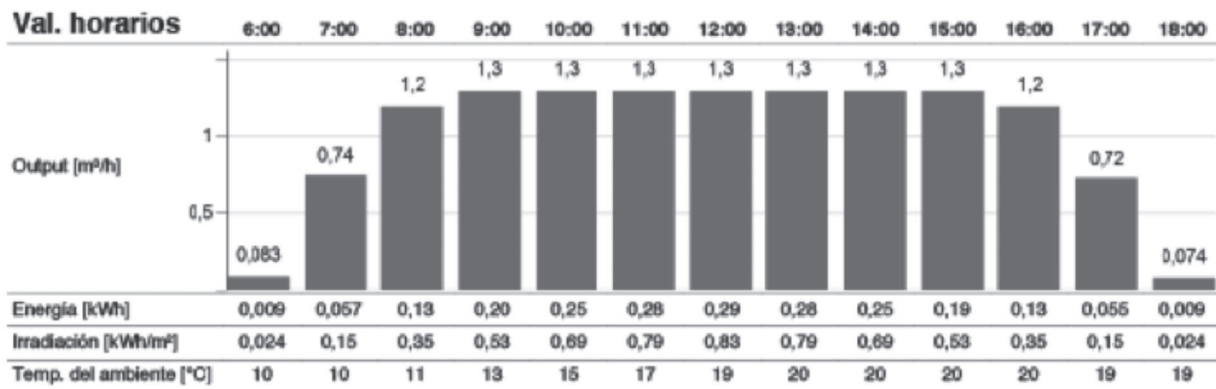
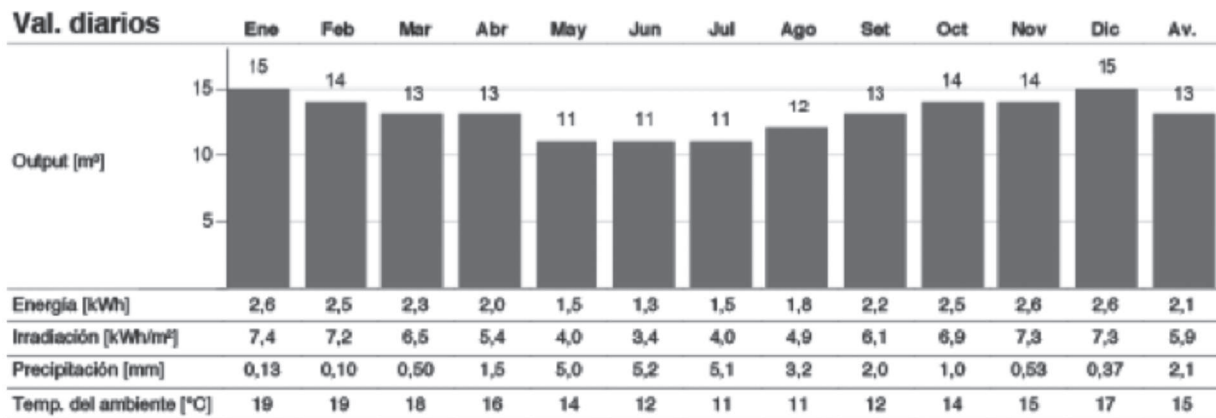
6.3.11. Peralillo – Chanco

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 2 paneles solares Risen de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 400Wp.

El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por estanque plástico, la cual en su interior se instalo un switch de corte por nivel de agua.

Rendimientos aproximados de la unidad:

Rendimiento diario en mes promedio 13 m³



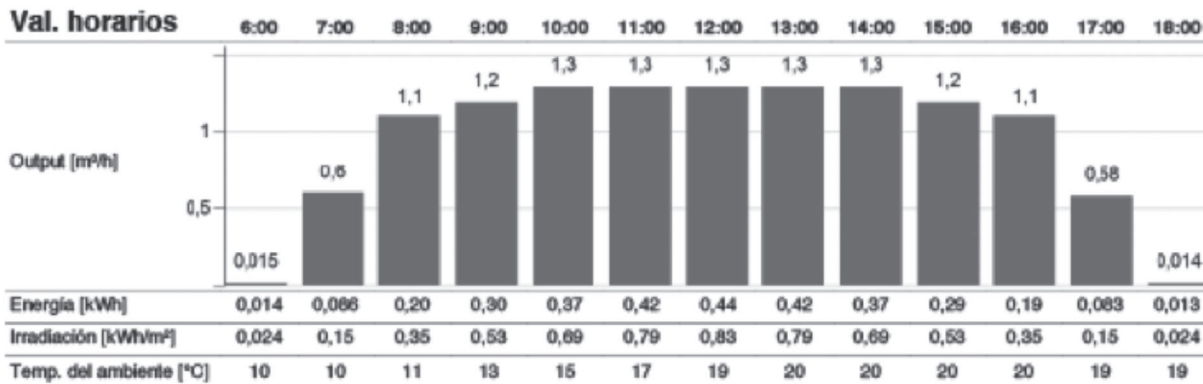
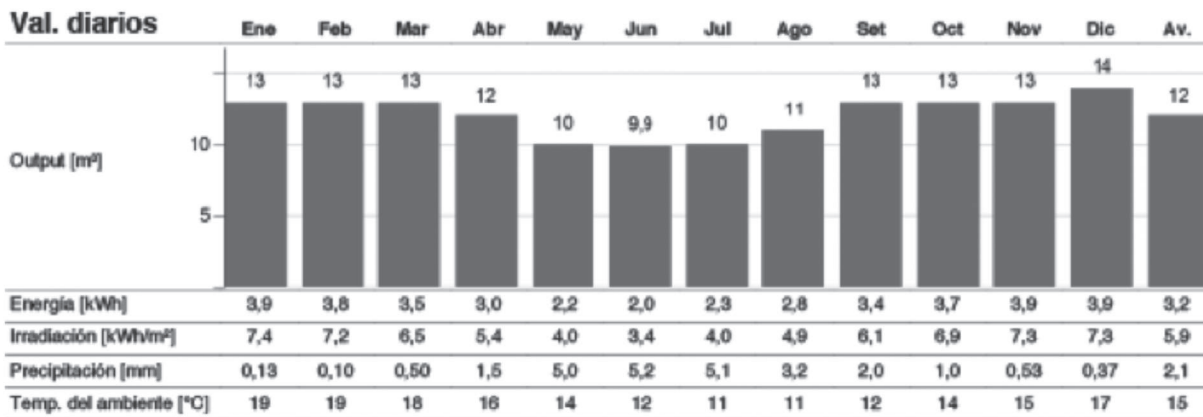
6.3.12. Quilhuéné – Chanco

Sistema de bombeo PS150 BOOST 330, con 3 paneles solares Hareon Solar de 200Wp monocristalinos, con una potencia total instalada de 600Wp.

El sistema de acumulación de aguas lluvias esta compuesto por un Flexitank, por lo que en esta unidad se instalo el sensor de funcionamiento en seco inserto en la tubería.

Rendimientos aproximados de la unidad:

Rendimiento diario en mes promedio 12 m³



7.- EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL SISTEMA

Producto de que la captación de aguas lluvias se planteó como un método para coleccionar el agua caída durante la temporada de lluvias y que su uso se realiza al menos dos a tres meses después de la fecha de captación; se recomienda tener en cuenta que siempre se deben hacer exámenes de la calidad del agua coleccionada y de su evolución en el tiempo. Esto para asegurar a la población el uso óptimo del recurso. Por ende, se recomienda realizar diagnósticos periódicos de la calidad del agua en base a la norma chilena para la calidad de agua potable (NCH 409) y la de agua de riego (NCH 1333), según sea el uso del agua almacenada. Estas normativas tienen la propiedad de indicar la calidad del recurso hídrico en base a la medición de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que indican ambas normas y sirven para determinar si dichas aguas están aptas para su uso como agua potable o de riego. El estudio consideró

analizar muestras de aguas en distintas épocas del año, para determinar si se generan variaciones significativas en los valores de los distintos parámetros que considera cada una de las normas.

En este contexto, se analizaron los parámetros fisicoquímicos que incluye la NCH 409 y la norma NCH 1.333. Los valores obtenidos se compararon con los límites máximos permitidos en cada una de las normas.

7.1. Muestreo de aguas y metodologías de análisis

a) Normativas y manuales de referencia

Para el muestreo del cuerpo acuático se sigue lo establecido en el Instructivo de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Marinas. Los procedimientos están contenidos en la Norma NCH. 411/6. Of.96 correspondiente a la “Guía para el muestreo de ríos y cursos de agua” (INN-Chile, 1999 d). Con respecto a las técnicas de muestreo, se consideró la norma NCH 411/2. Of.96 correspondiente a la “Guía sobre técnicas de muestreo”. Para la preparación de recipientes, identificación, llenado, preservación y transporte de las muestras, se siguieron las técnicas señaladas en la norma NCH 411/3.Of.96 correspondientes a la “Guía sobre preservación y manejo de las muestras”.

b) Obtención de muestras de aguas

Considerando que los muestreos se realizaron en distintos tipos de cisternas que se distinguen por su diseño y tipo de construcción, se debió proceder a coleccionar una muestra representativa en cada cisterna. Para la extracción de muestras, se abre la llave de salida y se deja correr como mínimo un minuto antes de tomar la muestra definitiva. Para las cisternas que no disponen de una llave de salida, las muestras se deben extraer hasta una profundidad que puede variar entre 50 a 80 cm. Se debió considerar las condiciones de colecta, tipo de envase, preservación y tiempo máximo entre la toma de muestra y el análisis correspondiente (Manual del Agua, 1993; Norma Chilena 409).

La extracción de muestras de 4 litros se debió realizar en envases de polietileno y de vidrio. Los envases de polietileno fueron lavados con una solución de detergente y luego con ácido clorhídrico concentrado de pureza técnica. Luego fueron enjuagados con agua corriente y tres veces con agua bidestilada. Los envases de vidrio se lavaron con detergente y luego con mezcla sulfocrómica. Posteriormente, fueron enjuagados con suficiente agua corriente y tres veces con agua bidestilada.

Para la extracción de las muestras, se llena el envase previamente con la muestra y se somete a enjuague con ella durante tres veces, de manera que el envase quede con ambiente de muestra. Finalmente, se extrae la muestra definitiva que va al laboratorio, para sus respectivos análisis. Los métodos de almacenamiento, preservación, análisis y límite de detección de las muestras, se entregan en la tabla 5.



Figura 77: Medición de parámetros químicos de las aguas acumuladas



Figura 78: Toma de muestras para análisis de calidad de aguas.

c) Metodologías de análisis

En terreno se midieron los parámetros temperatura, pH y conductividad. Para ello se utilizó, respectivamente, un sensor de temperatura, un peachímetro y un conductivímetro.

Las muestras de aguas colectadas en envases de vidrio y polietileno son filtradas en sistemas de policarbonato, para lo que se utilizaron filtros de 0,45 μm de porosidad. Las muestras filtradas permitieron la determinación de los parámetros que se incluyen en las NCH 409 (agua potable) y NCH.1333 (Agua de riego). Las muestras se deben mantener en cámara refrigerada a 4° C, hasta la realización de sus respectivos análisis químicos.

Las metodologías de análisis utilizadas para las determinaciones de los parámetros indicados corresponden a las presentadas por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [(1992)a., (1992)b, (1992)c]. Las determinaciones de metales se realizan por espectroscopía de absorción atómica (E.A.A.) (Perkin Elmer, 1990).

Los métodos de almacenamiento, preservación, análisis y límite de detección de las muestras se presentan en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5 Métodos de Almacenamiento, conservación, análisis, límites de detección y unidad de medida. Se indican los parámetros incluidos en la Norma Primaria (1°) y en la Norma Secundaria (2°) de la NSCA.

Parámetros	Norma	Tipo de Envase	Preservación	Tiempo de Conservación (días)	Técnica y/o Método	Límite de detección	Unidad de Medida
Temperatura	2°	-	-	(a)	Termométrico	± 0,1	°C
Conductividad	2°	-	-	(a)	Potenciométrico	0,1	µS/cm
PH	1°,2°	-	-	(a)	Potenciométrico	0,1	
Oxígeno disuelto	2°	Vidrio (Esmer.)	MnSO ₄ en solución yoduro alcalino	-	Winkler	0,1	mg/L
Color Verdadero	2°	Plástico o vidrio	Refrigeración	7	EAM	5	Pt/Co
Color aparente	-	Plástico o vidrio	Refrigeración	7	EAM	5	Pt/Co
Sólidos suspendidos	2°	Plástico o vidrio	Refrigeración*	1	Gravimétrico	0,1	mg/L
DBO5	2°	Plástico o vidrio	Refrigeración*	1	Winkler	0,1	mg/L
N-Total	-	Plástico o vidrio	H ₂ SO ₄ a pH <2 + Ref.	7	EAM	0,01	mg/L
Amonio	-	Plástico	Refrigeración*	1	EAM	0,005	mg/L
P-Total	-	Vidrio	Refrigeración*	1	EAM	0,01	mg/L
Metales	2°	Plástico	HNO ₃ a pH <1 + Ref.	90	E.A.A. Llama	0,06	mg/L
Hidrocarb totales	1°,2°	Alusa	Refrigeración*	90	IR-onda fija	0,08	mg/L
Coliformes totales	2°	Vidrio estéril	Refrigeración*	0,25	Tubos múltiples	2	NMP/100 ml
Coliformes fecales	1°,2°	Vidrio estéril	Refrigeración*	0,25	Tubos múltiples	2	NMP/100 ml

(a): Análisis “in situ”, E.A.A.: Espectrofotometría de absorción atómica; EAM: Espectrofotometría de absorción molecular; HPLC: Cromatografía de alta resolución con detector diodo; CG-DILL: Cromatografía –detector ionización llama; *: mantención a 5°C

Tabla 6. Métodos de almacenamiento, preservación, metodologías y límites de detección de parámetros fisicoquímicos (CONAMA, 2004).

Parámetros	Tipo de Envase	Preservación	Tiempo de Conservación (días)	Técnica y/o Método	Límite de detección mg/l
Aluminio	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,06
Arsénico	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Hidruro	0,005
Bario	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,1
Berilio	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Boro	P	Refrig. 2-5° C	1 semana	E.M.M	0,1
Cadmio	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,01
Cianuros	P o V	Agregar NaOH pH > 12	24 horas	E.M.M	0,05
Cloruros	P o V	Refrig. 2-5° C	1 semana	Argentométrico Mohor	7
Cobalto	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Cobre	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,02
Cromo	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,02
Fluoruro	P	Refrig. 2-5° C	1 mes	Elec. Específico	0,05
Hierro	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,02
Litio	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05

Continuación Tabla 6

Parámetros	Tipo de envase	Preservación	Tiempo de conservación (días)	Técnica y/o Método	Límite de detección mg/l
Manganeso	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,02
Mercurio	v	pH < 2 pH < 2	1 mes	E.A.A Vapor Frío	0,0005
Molibdeno	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,01
Níquel	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Plata	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,01
Plomo	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Selenio	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Hidruro	0,005
Sulfato	P o V	Refrig. 2-5° C	1 semana	E.M.M	2,5
Turbiedad	P o V	Refrig. 2-5° C	24 horas	Nefelometría	0,5 NTU
Vanadio	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Zinc	P o V	Acidificar con HNO ₃ pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,01
Aceites y grasas	V	Acidificar con Hcl pH < 2, Refrig. 2-5° C	24 horas	Extracción y Gravimetría	0,005
Alcalinidad total	P o V	Refrig. 2-5° C	24 horas	Volumetría	1
Sólidos disueltos	P o V	Refrig. 2-5° C	24 horas	Gravimetría	1

P: Plástico; V: Vidrio, E.A.A.: Espectrofotometría de absorción atómica, EAM: Espectrofotometría de absorción molecular.

7.2. Normativas vigentes para agua potable y de riego

Las Tablas 7 y 8 indican las NCH 409 y NCH 1333 correspondientes a las normativas vigentes para agua potable y riego, respectivamente. Ambas tablas incluyen los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, unidades de medida y límites máximos permitidos.

Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos y límites máximos permitidos por la NCH 409 (Agua Potable).

7.1 Parámetros Esenciales

Elemento	Unidad de expresión	Límite máximo
Cobre	mg/L Cu	2,0
Cromo total	mg/L Cr	0,05
Fluoruro	mg/L F ⁻	1,5
Hierro	mg/L Fe	0,3
Manganeso	mg/L Mn	0,1
Magnesio	mg/L Mg	125,0
Selenio	mg/L Se	0,01
Zinc	mg/L Zn	3,0

7.2 Parámetros o sustancias no esenciales

Elemento o sustancia	Unidad	Límite máximo
Arsénico	mg/L As	0,01
Cadmio	mg/L Cd	0,01
Cianuros	mg/L CN	0,05
Mercurio	mg/L Hg	0,001
Nitratos	mg/L NO ₃ ⁻	50
Nitritos	mg/L NO ₂ ⁻	3
Razón nitrato + nitrito	--	1
Plomo	mg/L Pb	0,05

7.3 Parámetros relativos a características organolépticas

Parámetros	Unidad	Límite máximo
Físicos		
Color verdadero	Pt/Co	20
Olor	-----	Inodora
Sabor	-----	Insípida
Inorgánicos		
Amoníaco	mg/L NH ₃	1,5
Cloruros	mg/L Cl ⁻	400
pH	-----	6,5 - 8,5
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	500
Sólidos disueltos totales	mg/L	1500
Turbidez	NTU	4,0
Orgánicos		
Compuestos fenólicos	µg/L Fenol	2

7.4 Parámetros microbiológicos

Parámetros	Unidad	Límite máximo
Coliformes totales	NMP/100 ml	5
Escherichacoli	---	Ausencia

Tabla 8. Parámetros fisicoquímicos y límites máximos permitidos por la NCH 1.333 (Agua de Riego).

Parámetros	Unidad	Ref.NCH 1.333
Temperatura	° C	V. N. + 3
pH	---	5,5 - 9,0
Conductividad	µS/cm	< 750
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	> 20,0
Aluminio (Al)	mg/L	5,00
Arsénico (As)	mg/L	0,10
Ba (Ba)	mg/L	4,00
Berilio (Be)	mg/L	0,10
Boro (B)	mg/L	0,75

Continuación Tabla 8

Parámetros	Unidad	Ref.NCH 1.333
Cadmio (Cd)	mg/L	0,010
Cianuros (CN -)	mg/L	0,20
Cloruros (Cl -)	mg/L	200,00
Cobalto (Co)	mg/L	0,050
Cobre (Cu)	mg/L	0,20
Coliformes fecales	NMP/100 ml	1000
Coliformes totales	NMP/100 ml	S/N
Color verdadero	Unid. Pt/Co	100,0
Cromo (Cr)	mg/L	0,10
Fluoruro (F -)	mg/L	1,00
Hierro (Fe)	mg/L	5,0
Litio (Li)	mg/L	2,50
Manganeso (Mn)	mg/L	0,20
Mercurio (Hg)	mg/L	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/L	0,010
Níquel (Ni)	mg/L	0,20
Oxígeno disuelto	mg/L	> 5,0
Plata (Ag)	mg/L	0,20
Plomo (Pb)	mg/L	5,00
RAS	--	S/N
Selenio (Se)	mg/L	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/L	250,0
Turbiedad	NTU	50,0
Vanadio (V)	mg/L	0,10
Zinc (Zn)	mg/L	2,0

7.3. Resultados

De los resultados obtenidos para la NCH 409 (agua potable), todos los parámetros alcanzan niveles de calidad, ya que las cisternas han realizado un adecuado almacenamiento del agua y esta ha sido preservada cuidándola de dejarla expuesta a la luz. Por otro lado, en algunas zonas no se cumple con el parámetro del pH, por lo que se registran valores ligeramente ácidos, lo que es normal en aguas lluvias.

Con respecto a la NCH 1333 (agua de riego), esta fue cumplida en general con mayor facilidad que la norma de agua potable. Aun así, hay algunos parámetros que en algunos casos no cumplen la norma, como es el caso del sodio porcentual y la alcalinidad. Este último tiene que ver con la presencia de sustancias alcalinas como carbonatos y bicarbonatos y como tal, tiene un efecto directo con el valor del pH. De todas maneras, ambos parámetros tienen que ver también con las características fisicoquímicas de los potenciales suelos agrícolas que utilicen dichas aguas.

En relación a los resultados de los análisis microbiológicos y a la presencia de coliformes (fecales y totales), se puede indicar que, en aquellos casos donde se superó la normativa vigente, se puede remediar con un proceso de cloración similar al que se utiliza para el agua potable.

8.- EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS.

Bajo un escenario de crisis de los recursos hídricos, las comunidades están llamadas a plantear alternativas de ahorro y uso sostenible del agua. Un sistema de captación de aguas pluviales permite gestionar este recurso, proveyendo una fuente alternativa de suministro para las actividades humanas. Este informe evalúa económicamente la implementación de un sistema de captación de aguas lluvias para 5 comunas de la región del Maule, Chile, como alternativa de abastecimiento de agua para consumo humano, animal y producción agropecuaria. Estas comunas se caracterizan por tener escasez de agua en periodo estival, lo que obliga a las municipalidades a transportar este recurso mediante camiones aljibes a las distintas localidades, con el consiguiente costo que esto conlleva.

En promedio cada sistema de captación de agua lluvia genera un VAN esperado de \$13.700.000, siendo las precipitaciones de la zona, el diseño del sistema y el costo de transportar un metro cúbico de agua, las principales variables que determinan este resultado y que explican las diferencias observadas en la creación de riqueza que el proyecto generaría en las comunas analizadas. Se puede concluir, por tanto, que la implementación de un sistema de agua lluvia para zonas rurales de la región del Maule es una inversión de bajo riesgo, cuya recuperación del capital se aproxima a 2,7 años y que genera un aumento en el bienestar regional.

8.1. Introducción

La demanda de agua tiene su origen en cuatro fuentes principales: agricultura, producción de energía, usos industriales y consumo humano. En cuanto a este último, la fuente de demanda más importante proviene de núcleos urbanos que requieren de agua para beber, saneamiento y drenaje.

Según datos de la UNESCO, en su Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos, a nivel mundial solo un 2,5% del total del agua es dulce, siendo la mayor parte subterránea y por tanto de difícil acceso. Solo un 0,007% está disponible en ríos y lagos, constituyendo la principal fuente de suministro para las actividades humanas. El bajo porcentaje de agua dulce disponible, los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico natural y la sobreexplotación y contaminación de las principales fuentes de agua, han generado una crisis mundial de los recursos hídricos. Guerrero *et al.* (2009) indican que en muchas regiones del mundo el agua se está convirtiendo en un factor limitante para la salud humana, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y la estabilidad económica y política.

Asimismo, en la cuarta edición del Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo (WWDR4-UNESCO, 2012) se señala que los suministros de agua dulce se distribuyen de manera irregular tanto geográfica como temporalmente. Entender esta variabilidad es crucial para una gestión eficaz de los recursos hídricos. América Latina es una región húmeda, aunque posee algunos sectores muy áridos. A pesar de que la mayoría de los países

tiene altos niveles de cobertura de agua mejorada y de instalaciones de saneamiento, hay una amplia variedad en cuanto a la calidad de los servicios y a las importantes diferencias entre las zonas rurales y urbanas. Las innovaciones tecnológicas y la capacidad humana aplicada a la gestión de este recurso son elementos que pueden marcar una diferencia en aquellas comunidades con escaso acceso a él. Cabrera (2006) señala que el ahorro del agua es una opción que siempre será más respetuosa con el medio natural que la alternativa de aumentar la oferta. Por tanto, es importante la aplicación y el uso de alternativas para el abastecimiento de agua como lo ofrecen los sistemas de captación de aguas lluvias (SCALLs), para satisfacer la demanda de los diversos consumos humanos.

Este informe evalúa económicamente la implementación de un sistema de captación de agua lluvia en las zonas rurales de las comunas de Curepto, Longaví, Chanco, Pelluhue y Licantén, pertenecientes a la región del Maule, Chile. Actualmente, durante el periodo estival, la demanda por agua de las comunas mencionadas es cubierta por medio de camiones aljibes que transportan el recurso a las localidades más alejadas. Cabe resaltar que cuatro de ellas están dentro del Decreto de emergencia agrícola por sequía emanado desde el Ministerio de Agricultura el año 2012. De esta manera, el agua lluvia que sea almacenada por el sistema constituye un importante ahorro en costos para las municipalidades de dichas zonas. Si bien se han reportado otros potenciales beneficios asociados a estos sistemas (mitigación de los efectos de inundaciones y sequías, disminución de las extracciones de agua de los acuíferos, entre otros) no serán considerados en la evaluación del proyecto por no aplicar al caso de las comunas analizadas.

Los resultados arrojan que cada SCALLs genera un VAN que fluctúa entre 12 millones y 17 millones aproximadamente, dependiendo de la comuna. El periodo de recuperación del capital promedio (Payback) es de 2,7 años. Usando el programa @RISK se sensibiliza el VAN en función de la precipitación anual media de cada comuna. Dado el diseño técnico del sistema se concluye que con un 99% de confianza promedio, el VAN del proyecto será positivo, lo que generará riqueza para la región.

En la sección dos del informe se presentan las características técnicas de un sistema de captación de aguas lluvias y, en particular, las utilizadas en este proyecto. La sección tres resume la metodología usada en la evaluación económica efectuada. La sección cuatro presenta los resultados obtenidos y, finalmente, la sección cinco contiene las principales conclusiones.

8.2. Características Técnicas

La Captación de Agua Pluvial (CAP) o Captación de Agua Lluvia (CALL), según Gleason (2005), es el término utilizado tradicionalmente para la recolección de agua de precipitación en países húmedos y áridos, en contextos de pobreza y riqueza y sirve para el abastecimiento de agua en los hogares, la producción agrícola, y el mantenimiento de espacios verdes y ecosistemas estratégicos para la vida urbana y rural.

Las prácticas ancestrales de uso del agua lluvia han existido a lo largo de la historia de la humanidad. El hombre ha aprovechado el agua superficial (ríos y lagos) como primera fuente de abastecimiento, consumo y vía de transporte. A medida que las civilizaciones crecieron demográficamente y algunos pueblos debieron ocupar zonas áridas o semiáridas del planeta, comenzó el desarrollo de formas de captación de aguas lluvias como alternativa para el riego de cultivos y el consumo doméstico. Diferentes formas de captación de agua lluvia se han utilizado tradicionalmente a través de la historia de las civilizaciones; pero estas tecnologías se han comenzado a estudiar y publicar solo recientemente, como respuesta a las actuales presiones sobre las fuentes finitas de agua.

Según Alfaro (2009) los sistemas de captación y aprovechamiento de aguas lluvias, comprenden un conjunto muy amplio de prácticas tendientes a coleccionar la precipitación para satisfacer demandas de abastecimiento de agua para consumo humano, producción silvoagropecuaria o el funcionamiento de sistemas naturales. Ruskin (2001) señala que existen dos técnicas principales para la captación del agua lluvia: sistema de captación de ladera, que consiste en despejar una extensión grande de terreno (como la ladera de un cerro) y cubrirla con material impermeable; y sistema de captación de techo, que atrapa el agua sobre el techo de una casa, de donde se desvía a una cisterna de acumulación.

Según Ballén *et al.* (2006), los sistemas de captación de agua lluvia son el resultado de las necesidades (demanda),

los recursos disponibles (precipitación, dinero para invertir y materiales de construcción) y las condiciones ambientales de cada región. Agrega que se piensa en buscar sistemas alternativos de abastecimiento, solo cuando la red de agua potable no existe, el suministro es deficiente o cuando el agua tiene un alto costo. Este es el caso de las zonas rurales de la región del Maule bajo estudio, donde la poca factibilidad de instalar tuberías de distribución de agua —dado lo remoto y/o empinado de los terrenos y la escasa población— obliga a realizar el abastecimiento del recurso mediante camiones aljibes, lo que genera un alto costo para los entes públicos que gestionan dicha distribución (municipalidades). Los SCALLs serían de esta manera, una alternativa apropiada para disminuir los costos de abastecimiento de agua.

Independientemente del sistema de captación utilizado, un Sistema de Captación y Aprovechamiento de Agua Lluvia tiene principalmente cuatro componentes, definidos por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2003):

- Captación: superficie destinada a la captación del agua lluvia.
- Recolección: conjunto de tubos o canaletas situadas en la parte baja del área de captación cuyo objetivo es recolectar el agua y conducirla hacia el interceptor.
- Interceptor: dispositivo que capta las primeras aguas de lluvia correspondientes al lavado del área de captación y que pueden contener impurezas de diversos orígenes.
- Almacenamiento o Cisterna: depósito destinado a la acumulación, conservación y abastecimiento del agua lluvia con fines domésticos o productivos.

No obstante, los aspectos fundamentales a la hora de diseñar y poner en marcha un proyecto de estas características son la elección del sitio para establecer el sistema, la demanda de agua de la población, la disponibilidad de agua, la determinación del área efectiva de captación del agua lluvia, la determinación del sistema de conducción del agua captada, del bombeo del agua almacenada y del sistema de tratamiento del agua de lluvia (Gaston, 2010).

La hipótesis que subyace al mencionado proyecto FIC es que mediante técnicas de ingeniería hidrológica e hidráulica, es posible capturar y almacenar cantidades suficientes de agua en zonas rurales de la región del Maule, para satisfacer las demandas de consumo de agua doméstico de los habitantes rurales y para mantener en niveles de mínima sustentabilidad los cultivos productivos del lugar en épocas de sequía y en período estivales.

A través de tres etapas iniciales (Diseño hidrológico, Diseño y Construcción, y Tratamiento de agua) y de dos etapas posteriores de evaluación (Eficiencia Hídrica y Calidad de agua), se determinó un diseño óptimo y eficiente de la hidrología del sitio y de la forma y materiales de la construcción del sistema de captación y acumulación de aguas lluvias. Además, estos pasos estuvieron acompañados de un tratamiento adecuado para el agua almacenada según el uso que se le dará. En particular, utilizando el registro histórico de estaciones pluviométricas en las comunas en evaluación, se definió una precipitación de diseño con un 90% de probabilidades de ser superada por la precipitación real, lo que asegura que en 9 de cada 10 años se contará con el agua disponible definida en el diseño (cisterna a plena capacidad). Las dimensiones del área de captación, ubicada en una ladera desprovista de vegetación e impermeabilizada, se determinaron en función de la precipitación de diseño, del coeficiente de escorrentía asociado al material impermeabilizador y del volumen de la cisterna.

Mediante unidades experimentales (ensayos) se concluyó que las áreas de captación con geomembrana y las excavaciones cubiertas con geomembrana (figura N°79) usadas como cisternas para la acumulación del agua, tienen mejor evaluación con un menor costo medido en pesos/m³ de agua acumulada. El área de captación definida es de 170 m² y la cisterna tiene una capacidad de 60 m³.



Figura 79: sistema de almacenamiento de agua lluvia con geomembrana

Sea $P = P(Q)$ la demanda por agua potable para consumo humano, consumo doméstico, producción agropecuaria y consumo animal de cada comuna, donde Q es la cantidad de agua potable consumida en la zona y P el precio del recurso. La función de bienestar social (W) asociada a una cisterna que produce agua para estos fines, usando como insumo el agua lluvia almacenada en un año, está dada por:

$$W(X_1, \dots, X_n, S) = \int_0^{Q_0} P(Q) dQ - V_s S \quad (1)$$

Donde S es la cantidad que se almacena en la cisterna en un año y el precio de mercado de un metro cúbico de agua lluvia.

La cantidad de agua lluvia que maximiza la función de bienestar social se obtiene de la condición de primer orden:

$$\frac{\partial W}{\partial S} = P(Q) \frac{\partial Q}{\partial S} - V_s = 0 \quad (2)$$

La expresión $\partial Q / \partial S$ corresponde a los metros cúbicos de agua potable que se pueden producir con un metro cúbico de agua lluvia (por ejemplo, si no hubiera ningún tipo de merma en la producción de la cisterna esta expresión debería ser igual a 1) o producto marginal del agua lluvia (PMgS). En condiciones competitivas, multiplicando PMgS por el precio de mercado de un metro cúbico de agua de riego (P), se obtiene el valor producto marginal del agua lluvia; esto es, el beneficio que obtiene la sociedad por metro cúbico de lluvia acumulado en la cisterna.

$$VPMg_s = V_s \quad (3)$$

En este contexto, el beneficio social anual de una cisterna está dado por la cantidad de agua lluvia que esta logre acumular al año:

$$\Delta W = P(Q) \frac{\partial Q}{\partial S} \Delta S - V_s \Delta S \quad (4)$$

Así, para que la construcción de una cisterna de aguas lluvia sea rentable socialmente, el valor actual neto del proyecto debe ser mayor que cero.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{V_s \Delta S_t}{(I+r)^t} > 0 \quad (5)$$

Donde I_0 es la inversión inicial, T es la vida útil de la cisterna y r la tasa de descuento o costo de capital social de la economía.

Se asume que durante las épocas de lluvias los pozos y fuentes de bombeo de agua potable se encuentran operando en condiciones adecuadas, por lo que no hay necesidad de utilizar el agua lluvia para consumo. Al acercarse a la época seca, el abastecimiento proveniente de estas fuentes merma, por lo que es importante llenar las cisternas durante los meses de invierno para protegerse durante la época seca que comienza. La cantidad de agua almacenada en un año dependerá del área de captación del sistema de aguas lluvias, de la pluviometría anual de la zona y de la capacidad del estanque de acumulación (cisterna).

Adicionalmente, se debe considerar que del total del agua lluvia que cae sobre la superficie de captación, solo una parte de ella llega a la cisterna debido a que existen ineficiencias en la conducción del agua por evaporación y absorción, entre otras. Por lo anterior se considera una eficiencia promedio de captación del 85%. Luego, para calcular el volumen efectivo de aguas lluvias captadas se debe considerar la siguiente ecuación:

$$S = \frac{P}{1000} * A_{cap} * e \quad (6)$$

Donde,

- S : volumen anual total de agua provisto por el sistema (metros cúbicos)
- P : precipitación anual media (milímetros)
- A_{cap} : área total de la superficie de captación (metros cuadrados)
- e : coeficiente de escorrentía (85%)

4. Resultados

Considerando la precipitación media anual de las zonas bajo estudio, se determinaron los litros de agua al año almacenados por el SCALLs, considerando como máximo 60 m³ anuales (60.000 litros), dada la capacidad del estanque de almacenamiento diseñado. La tabla 9 contiene esta información por sector. Se observa que, dado el diseño del sistema, en promedio la cisterna se encuentra a plena capacidad en todos los sectores.

Tabla 9: Volumen anual total de agua provisto por el sistema (litros), por sector

Comuna	Sector	Precipitación media anual (mm)	Coefficiente de escorrentía	\$ (m ³ /año)
Licantén	La Leonera	785,4	0,85	60,00
	Huapi	785,4	0,85	60,00
Curepto	El Molino	785,4	0,85	60,00
	Rapilermo Alto	785,4	0,85	60,00
	El Guindo	785,4	0,85	60,00
Chanco	Peralillo	879,4	0,85	60,00
	Quilhuené	879,4	0,85	60,00
	Lagunillas	879,4	0,85	60,00
Pelluhue	Ramadilla	879,4	0,85	60,00
	Peño Alto	879,4	0,85	60,00
Longaví	Los Marcos	875,5	0,85	60,00
	Loma de Vásquez	875,5	0,85	60,00

Actualmente durante el periodo estival, el abastecimiento de agua en las zonas estudiadas se realiza mediante camiones aljibes, los que transportan agua potable para consumo doméstico, animal y agropecuario. Por tanto, el precio de un metro cúbico de agua lluvia almacenada está dado por el costo de transportar un metro cúbico de agua potable al sector en cuestión. Este costo depende principalmente de la distancia que existe entre el centro de distribución de agua potable más cercano a la zona. La tabla 10 contiene para cada sector el precio promedio por metro cúbico de agua transportado por camiones aljibes. Esta información se estimó a través del valor anual total gastado por cada municipalidad por concepto de Arriendo de servicio de distribución de agua para consumo humano mediante camiones aljibes, dividido por los litros anuales transportados, para los años 2013 y 2014.

Tabla 10: precio metro cúbico de agua potable transportado en camión aljibe, por sector.

Sector	Vs (\$/m ³)
La Leonera	\$ 32.764
Huapi	\$ 32.764
El Molino	\$ 25.563
Rapilermo Alto	\$ 25.563
El Guindo	\$ 25.563
Peralillo	\$ 25.535
Quilhuené	\$ 25.535
Lagunillas	\$ 25.535

Continuación Tabla 4

Ramadilla	\$ 28.159
Peño Alto	\$ 28.159
Los Marcos	\$ 24.129
Loma de Vásquez	\$ 24.129
Promedio	\$ 26.950

Dado lo anterior, el ahorro anual promedio generado por cada SCALLs es de \$1.616.990. Considerando una inversión inicial que asciende a \$4.300.000, una vida útil de 20 años y utilizando una tasa descuento social de 6% (MIDEPLAN, 2014), el VAN social del proyecto asciende en promedio a \$14.246.748 por SCALLs. Complementariamente, se determina que el periodo de recuperación de la inversión o PayBack es de 2,7 años. La inversión inicial considera el costo de construcción del área de captación y el de acumulación, pero no el del terreno utilizado para el área de acumulación, bajo el supuesto de que este no presenta costo alternativo. Esta suposición podría dejar de ser válida en la medida que aumente la construcción de SCALLs en las zonas y que estos sean emplazados en terrenos que sí tengan un uso productivo alternativo.

Para conocer el comportamiento del VAN del proyecto y el nivel de riesgo asociado a la inversión, siempre es recomendable realizar simulaciones del proceso, toda vez que la riqueza creada, es decir el agua acumulada, depende entre otras cosas, de las características pluviométricas de cada zona. Mediante el programa @RISK 6.0 de Palisa de Corporation, se determina la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los registros de lluvia de cada comuna. Estos ajustes fueron contrastados con pruebas de bondad de ajuste a través del test Kolmogorov-Smirnov. En todos los casos, con un 90% de confianza, se puede verificar la hipótesis según la cual, la muestra utilizada procede de una distribución normal, cuya media y desviación estándar varían según comuna. De esta forma, se determinaron las probabilidades asociadas a la ocurrencia de lluvias en cada sector, lo que permite realizar un análisis de sensibilidad usando el mismo programa.

La tabla 11 contiene el VAN social esperado por SCALLs para cada una de las zonas estudiadas según sus propias características de pluviometría.

Tabla 11: valor Actual Neto Social Esperado generado por un sistema de captación de aguas lluvias de 170 m², por sector

Sector	Ahorro anual provisto por el sistema(\$)	E(VAN) \$
La Leonera	\$ 1.965.840	\$17.269.769
Huapi	\$ 1.965.840	\$17.272.862
El Molino	\$ 1.533.780	\$ 12.534.116
Rapilermo Alto	\$ 1.533.780	\$12.518.076
El Guindo	\$ 1.533.780	\$ 12.526.285
Peralillo	\$ 1.532.100	\$13.015.754
Quilhuené	\$ 1.532.100	\$ 13.019.897
Lagunillas	\$ 1.532.100	\$ 13.020.781
Ramadilla	\$ 1.689.540	\$14.799.741
Peño Alto	\$ 1.689.540	\$14.786.228
Los Marcos	\$ 1.447.740	\$12.199.835
Loma de Vásquez	\$ 1.447.740	\$12.200.874
Promedio	\$ 1.616.990	\$ 13.763.685

Del mismo análisis anterior, se tiene que con un 99% de confianza el VAN del proyecto es positivo. Lo anterior es consistente con las características de diseño del sistema, basadas en una precipitación calculada con probabilidad de 0,1; esto quiere decir que en un 90% de los casos, la precipitación de diseño será superada por la precipitación real caída.

Es interesante estudiar si la precipitación de diseño especificada maximiza el VAN social esperado del proyecto, y si optimiza el VAN por m³ de agua esperado. Si se considera una precipitación de diseño para ser excedida en un 50% de los casos por las precipitaciones reales, manteniendo constante la capacidad de la cisterna, el área de captación necesaria se reduce a 85 m². Lo anterior abarata la inversión inicial requerida, pero también el ahorro presupuestado en costo anual. Bajo este escenario, el VAN social esperado en cada una de las comunas disminuye, al mismo tiempo que aumenta la desviación estándar, incrementando el coeficiente de variación del proyecto, lo que no es deseable desde el punto de vista económico. Replicando este análisis de escenario para una precipitación de diseño tal que la probabilidad de excedencia sea 70%, se obtiene un resultado similar, es decir, disminuye el VAN social esperado y aumenta la desviación estándar del VAN. La tabla 12 contiene los resultados del análisis de escenario efectuado.

Tabla 12: VAN esperado, DS del VAN y VAN por metro cúbico de agua (promedio de las 5 comunas), según precipitación de diseño

	Escenario 1: P(pp efectiva >pp de diseño) > 0,5	Escenario 2: P(pp efectiva >pp de diseño) > 0,7	Escenario 3: P(pp efectiva >pp de diseño) > 0,9
E(VAN)	\$ 12.782.559	\$ 13.440.055	\$ 13.763.685
DS VAN	\$ 3729779,083	\$ 224.000,92	\$ 2.112.799
CV	0,29	0,24	0,15
E(VAN/m ³)	\$217.970,56	\$ 224.000,92	\$ 229.395

Finalmente, respecto de la calidad del agua almacenada, a partir de un primer muestreo reportado por los ejecutores del proyecto FIC, se ha determinado el cumplimiento de un 95% de los parámetros fisicoquímicos para agua potable, y donde un 93% de los parámetros medidos cumple con los requisitos fisicoquímicos para agua de riego. Respecto de los resultados de los análisis microbiológicos y a la presencia de coliformes, se puede indicar que en aquellos casos donde se supere la normativa vigente, se puede remediar con un proceso de cloración similar al que se utiliza para el agua potable, lo que permitiría que el agua captada y almacenada tenga la calidad requerida según los usos determinados para cada SCALLs. Si este fuese el caso, se debe sumar a la inversión inicial el costo del kit de cloración, que no representa un porcentaje mayor al 5% del costo total de la inversión, y no altera significativamente los resultados encontrados.

9.- RESULTADOS ALCANZADOS EN EL PROYECTO

Para la construcción de las 12 unidades piloto de los sistemas de captación de aguas lluvias, se utilizaron distintos materiales, tanto en el área de captación como en el área de acumulación. Para el área de captación se utilizó hormigón armado y geomembrana.

De estos dos materiales, el que mejor se comporta es la geomembrana, debido a que pierde menor cantidad de agua al escurrir y al no ser un material poroso como lo es el hormigón. El coeficiente de escorrentía alcanzado en diferentes pruebas superó el valor 0,85 a 0,9 en tanto que el hormigón no sobrepasó el umbral del 0,70. Por otro lado, el hormigón es sometido a altas temperaturas, como ocurre en la época estival, lo que provoca la aparición de pequeñas grietas, producto de un mal fraguado que es muy común en zonas rurales, derivado de que no siempre se cuenta con agua de calidad para establecer la mezcla adecuada de materiales y para favorecer el fraguado, de forma posterior a su instalación. Todo esto hace encarecer su construcción por las mantenciones que habría que hacer en el futuro.

Por tanto y en relación a las áreas de captación y a los materiales probados, el que mejor se comportó para este tipo de sistema de captación de aguas lluvias es la geomembrana, dado que es un material más ductil de trabajar y es más fácil de encontrar filtraciones posteriores.



Figura 80: área de captación de geomembrana



Figura 81: área de captación de hormigón

Para la acumulación de agua, se probaron los siguientes tipos de estanques o cisternas:

- Estanque generado por la excavación en terreno, revestido con geomembrana
- Estanque de hormigón
- Estanque australiano
- Estanque de fibra de vidrio
- Estanque de polietileno
- Tanque flexible



Figura 82: cisterna de acumulación generada por una excavación revestida con geomembrana



Figura 83: cisterna de acumulación de hormigón

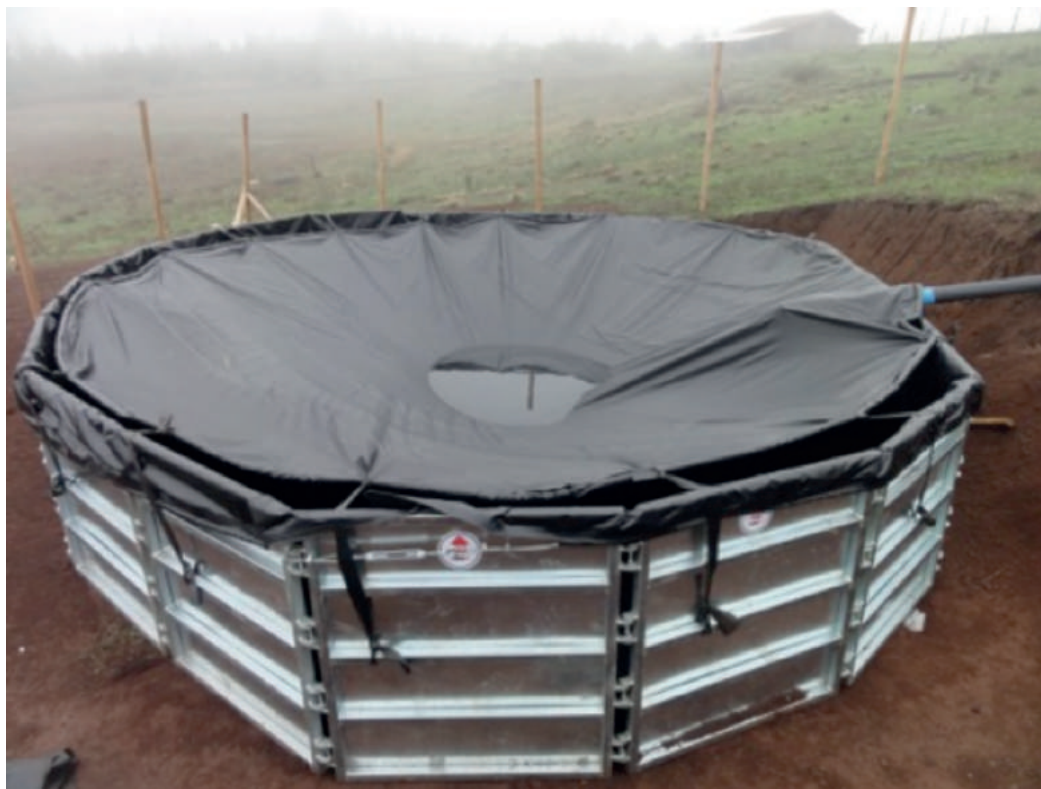


Figura 84: cisterna o estanque australiano



Figura 85: cisterna o estanque de fibra de vidrio



Figura 86: cisterna o estanque de polietileno



Figura 87: estanque flexible o flexitank

De todos estos estanques, el más económico en términos de costo por metro cúbico, es aquel generado por una excavación en terreno y revestido con geomembrana. Sin embargo, debe quedar muy bien armado y se debe fabricar solo en suelos con una mecánica de suelos muy estable, ya que en terrenos blandos, tiene una alta probabilidad de que la estructura se desmorone, especialmente si no se toma en cuenta la escorrentía producida por las lluvias, que en su circulación por el terreno puede dañar la obra. Asimismo, el estanque de hormigón se debe fabricar en suelos con una mecánica estable, ya que con cambios en la capacidad de soporte del suelo, el hormigón puede fracturarse, con lo cual se tendrán filtraciones, que son difíciles de encontrar y costosas de reparar.

En relación al estanque australiano se requiere que quede muy bien armado, ya que se pueden presentar problemas con la tapa del mismo, lo que puede provocar que el agua quede en contacto con el exterior, lo que se traduce en la menor duración de ella y posibles contaminaciones con elementos indeseados. Asimismo, su costo es muy alto.

Otro de los estanques utilizados, fue el estanque de fibra de vidrio. Este presenta una muy buena aislación a la luz y a otros elementos contaminantes, ya que posee una tapa muy hermética. El problema que presenta esta cisterna son las dimensiones de la estructura, por lo que para su uso se deben tener presente todos los aspectos logísticos que permitan su traslado sin problemas, hasta el punto de instalación. Por ello, se recomienda su uso en puntos que queden en las cercanías de caminos. La misma situación hay que tener presente con el estanque de polietileno. Este tipo de estanques son adecuados para zonas que presenten un fácil acceso a las unidades, ya que por sus dimensiones, se podrían presentar dificultades para trasladarlos hasta el punto final de la instalación. El punto positivo de estos estanques es que no se presentan problemas de filtraciones y evaporación por efecto de las temperaturas, ya que son completamente herméticos.

El último de los estanques utilizados son los flexitank o estanques flexibles. Éstos tienen la particularidad de que se expanden de acuerdo a la cantidad de agua acumulada. Es por eso que se deben instalar en superficies sin pendiente, ya que el recipiente puede voltearse, lo que provocaría grandes problemas si llegase a caer sobre algún animal, personas o viviendas. Además, al instalar estos estanques, la superficie debe tener un muy buen control de malezas, sobre todo de aquellas malezas espinosas, ya que se puede romper el estanque y se perderá el agua acumulada. Otro aspecto a considerar de estos estanques, es que por su material y la exposición al sol, el agua acumulada se verá afectada en su temperatura, lo que para el caso de riego podría ser dañino.

En relación a los costos de estas obras, el sistema de Loma de Vasquez, ubicado en la comuna de Longaví presenta el valor de construcción más bajo (MM\$ 2,7), mientras que el sistema de La Leonera, ubicado en la comuna de Licantén, el valor más alto (MM\$ 5,5), debido a que este último cuenta con un estanque de polietileno de 30 m³ de capacidad. En este último el transporte e instalación del estanque encarece su valor por las dimensiones de este. Por otro lado, el costo por m³ acumulado fluctúa entre \$ 71.667 en la unidad del sector Rapilermo Alto, ubicado en la comuna de Pelluhue, y a \$210.000 en la unidad de Ramadilla, en la misma comuna. Estas diferencias radican en que el valor de los estanques varía en función de su volumen y el valor del transporte y maquinaria utilizada para la instalación de los mismos.

Tabla 13: costos de construcción de las unidades y costos aproximados por m³ acumulado.

Comuna	Sector	Área de Captación	Área de Acumulación	Valor aproximado (MM\$)	Valor aproximado (\$/m ³)
Licantén	La Leonera	90 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	30 m ³ estanque vertical de polietileno	5,5	183.333
	Huapi	150 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	50 m ³ Excavación en terreno revestida con geomembrana	4,6	92.000
Curepto	Los Molinos	115 m ² geomembrana HD	40 m ³ Tanque flexible de pvc	4	100.000
	Rapilermo Alto	170 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	60 m ³ Excavación en terreno revestida con geomembrana	4,3	71.667
	El Guindo	85 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	30 m ³ Tanque flexible de pvc	3,2	106.667
Chanco	Peralillo	50 m ² geomembranaHD 1 mm de espesor	20 m ³ Estanque vertical de polietileno	3,7	185.000
	Quilhuené	120 m ² geomembrana	50 m ³	4,9	98.000

		HD 1 mm de espesor	Tanque flexible de pvc		
	Lagunillas	50 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	20 m ³ Tanque flexible de pvc	2,1	105.000
Pelluhue	Ramadilla	50 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	20 m ³ Estanque vertical de fibra de vidrio	4,2	210.000
	Peuño Alto	90,05 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	40 m ³ Estanque Australiano de Geomembrana	5,0	125.000
Longaví	Los Marcos	80 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	30 m ³ Estanque de hormigón armado	4,6	153.333
	Loma de Vásquez	60 m ² geomembrana HD 1 mm de espesor	30 m ³ Tanque flexible de pvc	2,7	90.000

En términos de la calidad del agua y a través de los análisis químicos realizados, la calidad fue excelente, tanto para la norma de agua potable como para riego. Incluso después de 6 meses de tomadas las muestras, el agua mostró tener una muy buena calidad. Ahora, para que el agua pueda ser bebida por los usuarios, se instalaron sistema de cloración a 11 de los 12 sistemas. Esto porque el agua del sistema al que no se le instaló el clorador, será utilizada solo para riego.



Figura 88: sistema de cloración de los sistemas de captación de aguas lluvias

Por otra parte, la construcción de estos sistemas de captación de aguas lluvias ha llamado la atención de varios sectores productivos. Es por esa razón que el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) ha construido 28 sistemas de captación de aguas lluvias a partir del año 2014 a la fecha y se estima que al año 2018 construirá 80 sistemas más en la Región del Maule. Dichos sistemas tienen como objetivo satisfacer las demandas de los sectores de más difícil acceso a camiones aljibes. Por otro lado, en la Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos, se ha promocionado la realización de un sinnúmero de estas obras a lo largo del país.



Figura 89: sistema de captación de aguas lluvias instalado por INDAP en el sector Huilliborgoa, San Rafael

Finalmente, la tecnología de captación de aguas lluvias, a través de este proyecto ha demostrado ser capaz de constituirse en un elemento para aumentar la oferta de agua y suplir las falencias de abastecimiento hídrico en áreas rurales, en el plano de las demandas para uso doméstico, agropecuario e incluso incendios forestales. Sin embargo, es preciso señalar que muchas de las carencias de agua que se advierten actualmente en el país, obedecen más bien a un uso exagerado del recurso, el cual no toma en consideración las reales disponibilidades de los ecosistemas. Por tanto, la incorporación de tecnologías de este tipo debe ir de la mano con otras que propendan a restaurar los equilibrios hidrológicos de las cuencas del país, más que a aumentar los usos indiscriminadamente, dado que esta última opción no es sustentable ni en tiempo ni en espacio.

10.- PROSPECTIVAS DE LOS SCALLS – SU APLICACIÓN EN ZONAS URBANAS

Pablo A. Garcia-Chevesich, Ph. D.

University of Arizona

Department of Hydrology and Atmospheric Sciences/Department of Agricultural and Biosystems

Engineering

International Sediment Initiative. UNESCO

10.1. Introducción

Una manera simple y eficaz para maximizar los abastecimientos de agua es la captación y almacenamiento del agua de lluvia. Durante milenios, las civilizaciones han reconocido los beneficios del almacenamiento pluvial. Cualquier región que recibe precipitación es candidata a beneficiarse del agua de lluvia. Incluso un techo de 180 metros cuadrados en el desierto de Arizona, el cual recibe a veces no más que cinco pulgadas de lluvia anualmente, puede generar más de 20 metros cúbicos de escurrimiento superficial.

La captación de aguas lluvia se define como la canalización o colecta de precipitación para su uso en algún propósito. Su amplio espectro abarca desde estructuras tan simples como un barril o pequeño estanque, hasta estructuras lo suficientemente grandes como para permitir la navegación o los usos recreativos. Asimismo, existen sistemas carentes de estructuras, cuya función es simplemente desviar el agua de lluvia a un jardín o huerta.

En términos generales, las técnicas de captación de agua de lluvia son clasificadas en dos categorías: los *sistemas pasivos* y los *sistemas activos*. Los primeros utilizan partes móviles y generalmente involucran movimientos de tierra y modificaciones del paisaje para el desvío de aguas pluviales hacia algún lugar deseado. Esencialmente, almacenan agua en el suelo en lugar de una estructura de contención. Algunos ejemplos de *sistemas pasivos* son cunetas de calle y pavimentos permeables, que no son el objetivo de este documento.

Los *sistemas activos* de captación, por otro lado, emplean estructuras de contención que almacenan agua de lluvia para utilizarla posteriormente. Pueden tener tubos, canaletas, bombas hidráulicas y sistemas de filtrado. Generalmente, son mucho más costosos que los *sistemas pasivos*. Entre los ejemplos más comunes de *sistemas activos* en Estados Unidos, se encuentran los barriles de acumulación de lluvia, tanques de recolección subterráneo y grandes cisternas de almacenamiento sobre el suelo. La utilización del agua acumulada pueden variar entre riego de jardines y huertas, usos domésticos y hasta consumo para personas y animales. Cabe señalar que, aunque los sistemas de recolección de agua de lluvia construidos con fines potables son relativamente populares en los Estados Unidos, estos están instalados en su mayoría en las zonas rurales, lejos de las líneas del suministro de agua municipal. Por ende, los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALLs) para uso potable no se cubrirán en este capítulo. Este documento se centra en la experiencia norteamericana en SCALLs con fines de irrigación en las zonas urbanas del suroeste de los Estados Unidos, donde el agua es más escasa. El documento aborda la influencia del cambio climático en la presencia de SCALLs, las leyes y reglamentos vigentes relacionados con la captación de aguas lluvia; y las prácticas y las alternativas de diseño de SCALLs.

10.2. Breve historia de los SCALLs

La captación y el almacenamiento de agua de lluvia no es una nueva tecnología (Figura 90). La construcción de

pequeñas presas y medios de control de la escorrentía para fines agrícolas, se remonta a tiempos remotos. Un ejemplo de ello son las terrazas de arroz en las Filipinas, las cuales se han utilizado desde hace miles de años y todavía resultan ser una técnica eficaz en la actualidad. El uso de diques de tierra para controlar la escorrentía superficial también se practicaba en el antiguo Egipto.



Figura 90. Sistema de captación de aguas lluvia construido en 200 a.C. en un teatro romano ubicado en Amman, Jordania. Imagen cortesía de Brad Lancaster (www.HarvestingRainwater.com).

Roma fue un ejemplo notable del uso de las aguas lluvias para satisfacer las demandas de las ciudades, lo que la volvió el mayor ejemplo de uso de estas técnicas en la antigüedad. Sin embargo, la recolección de agua de lluvia y el almacenamiento en cisternas cerradas, nunca fueron utilizados de nuevo en la misma medida que en la antigua Roma. Estas se emplearon en ocasiones en que las circunstancias exigían una tecnología apropiada, como ocurrió en zonas semidesérticas, donde se construían viviendas sin la presencia de manantiales o pozos en los alrededores. Así, los SCALLs se han utilizado en lugares tan diversos como monasterios cristianos en la Europa medieval, o en el actual suroeste de los Estados Unidos. Sin embargo, la técnica desapareció gradualmente gracias a la creciente urbanización, a la alta necesidad de un suministro de grandes cantidades de agua para la industria y al estricto nivel de higiene hídrica que se lograba a través de centrales de tratamiento.

Pese a lo anterior, los SCALLs están ganando importancia de nuevo, mayormente en zonas rurales y especialmente en muchos países en desarrollo. La situación actual en estos últimos casos, exige la utilización y el desarrollo de todas las fuentes posibles para garantizar el suministro de agua. Sin embargo, en Estados Unidos se han estado desarrollando distintas técnicas de captación y acumulación de aguas pluviales, como se verá en otras secciones de este capítulo.

10.3. SCALLs como adaptación frente al cambio climático en Estados Unidos

Los cambios climáticos a gran escala han ocurrido en forma natural a lo largo de la historia de la Tierra y dentro de ellos, se encuentran las variaciones de precipitación global. Su exponente más devastador es la sequía y entre sus causas se cuentan cambios en la órbita de la Tierra, ciclos solares, placas tectónicas, mega-erupciones volcánicas y los impactos de meteoros, por mencionar los más relevantes.

Es evidente que durante miles de años, las personas que viven en distintas regiones climáticas del mundo, han desarrollado numerosas técnicas indígenas de captación y almacenamiento del agua de lluvia, como una forma de enfrentar las sequías. Existen varios estudios que han documentado cambios climáticos abruptos y condiciones

de sequía extrema a lo largo del actual territorio estadounidense, durante el Holoceno. Por otra parte, la famosa gran sequía 'DustBowl' impactó severamente a Estados Unidos durante 1934, 1936, y entre 1939 y 1940. Recientes estudios de largo plazo sobre la variabilidad de las sequías en los últimos 2000 años, en base al uso de los datos paleoclimáticos, sugieren que sequías tan severas como las ocurridas en la década de 1930, no han ocurrido desde 1700. Un ejemplo particularmente notable y basado en anillos de árboles, es la colonia perdida de Roanoke Island, que desapareció durante la sequía más extrema ocurrida en 800 años (1587-1589 d.C.). Las muertes humanas y el abandono casi total de la Colonia de Jamestown sucedieron durante el episodio más seco ocurrido en 770 años, el cual perduró por siete años (1606-1612).

Aparentemente, la existencia de más de 2.6 millones de pequeños cuerpos de agua artificiales encontrados en territorio estadounidense, pudo ser una técnica de adaptación a las fluctuaciones climáticas de antaño. Además, en muchas partes del mismo territorio se construyeron pozos como estrategia de adaptación frente a cambios durante el holoceno. De hecho, el descubrimiento de un pozo prehistórico en respuesta a una sequía ocurrida durante la transición Pleistoceno-Holoceno, por el pueblo Clovis alrededor del año 11.500 a.C., representa la adaptación más antigua y prehistórica en el territorio norteamericano. El pueblo Clovis también representa uno de los primeros indicios de captación de aguas pluviales, las que se dirigían a los mencionados pozos, siempre como una adaptación a cambios climáticos.

A pesar de los cambios climáticos naturales ocurridos en el pasado, la mayoría de los científicos y estudios coinciden en que las variaciones globales actuales son consecuencia del aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, especialmente del dióxido de carbono (CO₂). Como medida de adaptación, es lógico pensar que la captación de aguas pluviales es más importante hoy que en cualquier otro momento dentro del Holoceno, por varias razones:

- Más de la mitad de la escorrentía de agua dulce accesible a nivel mundial ya está asignada para uso humano.
- Más de 1×10⁹ personas actualmente no tienen acceso a agua potable.
- Puesto que la población humana crecerá más rápido que los incrementos en la cantidad de agua dulce utilizable, la disponibilidad per cápita del recurso disminuirá en el próximo siglo.
- La construcción de nuevas represas y embalses podría aumentar la escorrentía accesible en aproximadamente un 10%, en los próximos 30 años, mientras que la población se prevé que aumente en más de un 45% durante ese período.

10.4. Leyes de captura de agua de lluvia en los Estados Unidos

Los registros de sequías y las preocupaciones relacionadas con el abastecimiento de agua, han servido como catalizadores para la creación de nuevas leyes que involucran captación y almacenamiento de agua de lluvia para distintos usos en los Estados Unidos.

Desde comienzos del presente siglo, se ha incrementado el interés de incorporar los SCALLs en la legislación estatal de los Estados Unidos, lo que permitiría definir y clarificar cuándo la captura y acumulación de agua de lluvia puede realizarse (Figura 91). Según las leyes estadounidenses, la captación de agua de lluvia es el acto de utilizar un sistema de recolección de agua de lluvia para un uso doméstico, irrigación, ganadero e incluso sanitario. Algunos estados también han aprobado leyes que fomentan el uso de aguas grises para el riego y otras aplicaciones de conservación del agua.

Cada Estado debe garantizar los estándares de calidad del agua capturada, con el fin de asegurar la salud pública. Por ende, las pautas a cumplir dependen del uso se le dará al agua de lluvia. Para sistemas urbanos, lo más común es irrigación, por lo cual el nivel de exigencia es menor en estos casos. Sin embargo, puesto que cada Estado desarrolla su propio sistema legal, el concepto de captura de agua de lluvia varía dependiendo de dónde se instala el SCALL. Pese a que la mayoría de los estados incentivan la captura y uso de agua de lluvia, en Colorado se tiene la visión de que toda agua que cae debe dejarse fluir, pues de este modo el agua producida por la cuenca puede ser utilizada por quienes poseen los derechos de agua. Sin embargo, Colorado ha promulgado dos leyes importantes al respecto; una que permite a los dueños de ciertos tipos de pozos el uso de agua de lluvia, y otra que autoriza proyectos piloto de desarrollo.

Texas, Ohio, Oklahoma y Arizona son algunos de los estados que han dedicado una considerable atención a este tema, hecho que se traduce en la promulgación de un alto número de leyes que regulan la práctica de la captura de aguas pluviales. Texas ofrece, por ejemplo, una exención del impuesto sobre las ventas en la compra de equipos de recolección de agua de lluvia. Y al igual que Ohio, permite abiertamente la captura pluvial para fines potables. Por otro lado, Oklahoma aprobó en el 2012 la Ley del Agua para el 2060, con el fin de promover proyectos piloto para el uso de agua de lluvia y aguas grises. Similarmente, Arizona, uno de los estados líderes en el uso de SCALLs, promueve exhaustivamente el uso del agua de lluvia para regadío, en combinación con una arquitectura del paisaje basada en especies de bajo requerimiento hídrico y la ausencia absoluta de césped.

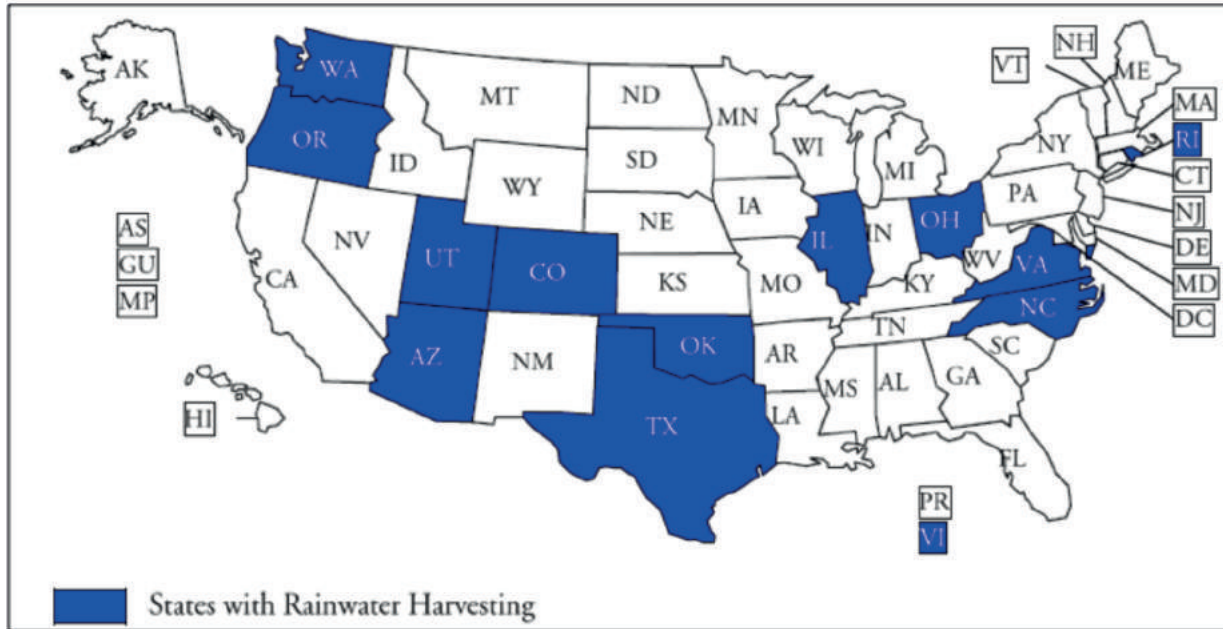


Figura 91. Mapa de los estados norteamericanos que han incorporado la captura de aguas lluvias dentro de su sistema legal. Imagen cortesía de National Conference of State Legislatures, 2012.

Con la excepción de Colorado, la mayoría de los estados norteamericanos que han incorporado la recolección de agua de lluvia en su sistema legal, tratan de promover la captura y almacenamiento del recurso, en base a reducciones de impuestos a pagar y, en algunos casos, considerando reembolsos monetarios directos según lo que haya gastado el propietario en la compra e instalación del sistema. Tal vez el más completo sistema legislativo relacionado con los SCALLs está en Texas, ya que considera el almacenamiento de agua de lluvia para uso potable, doméstico e irrigación, siendo este obligatorio en la mayoría de las construcciones nuevas. También tienen instituciones financieras involucradas y estrictos estándares de calidad, lo que obliga a cada condado a promover el uso del agua de lluvia entre sus residentes. Adicionalmente, Utah cuenta con una ley en la que incluso los arrendatarios que alquilan una propiedad pueden instalar un SCALLs, sin importar los deseos del propietario. Por último, Arizona ofrece hasta US\$ 2.000 en devoluciones de impuestos y, lo más importante, el Estado da incentivos para captar la lluvia no solo en el nivel del techo, sino también la escorrentía generada en el jardín residencial e incluso desde la escorrentía urbana que fluye por las calles.

10.5. Prácticas de captación de aguas pluviales en zonas urbanas de los Estados Unidos

Existe una gran variedad de técnicas utilizadas para captar y almacenar la lluvia en zonas urbanas de los Estados Unidos. En términos generales, esas prácticas se pueden dividir en varias categorías, todas ellas basadas en el principio de “no desperdiciar ni una gota de agua”, como se ilustra en la Figura 92. Estas categorías se clasifican según dónde se encuentra el área de captación: techos, jardines y calles.

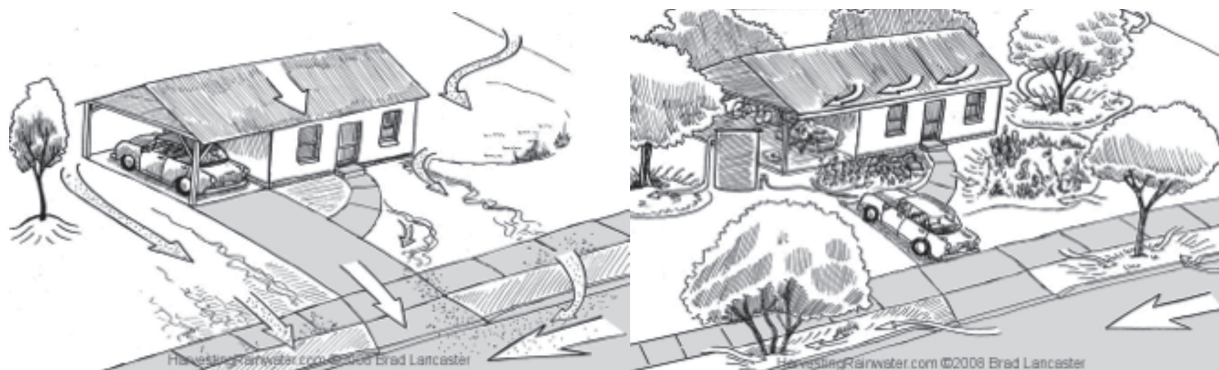


Figura 92. La captura de agua de lluvia en los Estados Unidos es una práctica que implica el almacenaje de la escorrentía producida en techos, jardines y calles, todo bajo el principio de “no perder una sola gota de agua”. Imágenes cortesía de Brad Lancaster (www.HarvestingRainwater.com).

10.5.1. Captación de agua de lluvia en techos

Este tipo de captura de agua de lluvia, es de lejos el más popular en los Estados Unidos, habiendo incontables prototipos y alternativas disponibles para capturar la escorrentía generada en los techos. Como es el caso de muchos países, el diseño de un SCALLs involucra cinco componentes fundamentales: área de captación, red de transporte, conductor de primer lavado, filtros y la cisterna propiamente tal.

La superficie que recibe a la lluvia y genera la escorrentía que será almacenada, es el área de captación del SCALLs. El techo de una casa o galpón es la primera opción para la captación pluvial. La calidad del agua proveniente de distintos techos está en función del tipo de material del cual está construido, de las condiciones climáticas y del medio ambiente circundante. Además, la cantidad de agua de lluvia que se puede captar de un techo está en función de la textura del material: mientras más suave e impermeable es la superficie, más agua de escorrentía se genera. Sin embargo, lo que genera más escorrentía no siempre es lo más apropiado en términos de calidad del agua.

A diferencia del metal, que es utilizado profusamente en techos de construcciones rurales, se prefiere evitar el uso de tejas de arcilla u hormigón, pues estas últimas son más porosas, lo que puede representar más pérdidas hidrológicas. Sin embargo, para revertir esta desventaja se suele aplicar un sellante, para así reducir las pérdidas hidrológicas, teniendo siempre presente que si se utiliza pintura no adecuada, hay una alta posibilidad de lixiviación de toxinas. Similarmente, los techos de metal deben ser inoxidable, debido a sus efectos en la lixiviación dentro del sistema. Los techos de piedra son ideales como superficie de captación, aunque no muy comunes debido a su elevado peso por unidad de superficie. Otros materiales como techos de madera, alquitrán o grava son menos comunes incluso, pero muy adecuados como sistemas de captación pluvial.

El escurrimiento superficial generado sobre el área de captación, debe ser transportado a la cisterna de almacenamiento. La instalación de la red de transporte se lleva a cabo comúnmente utilizando un sistema de tuberías. Las tuberías transportadoras deben ser resistentes a la intemperización y a los rayos UV (por lo general PVC), y sus dimensiones dependerán del diseño hidrológico. Usualmente, la escorrentía generada se transporta por medio de la instalación de canaletas, las que conducen el agua a tuberías y desde allí el sistema se conecta con la cisterna de almacenamiento.

Dependiendo del clima en que el propietario se encuentre, un techo puede tener una superficie de acumulación natural de polvo, hojas, flores, ramas, insectos, excrementos de animales, pesticidas y otros residuos que viajan con el viento en forma suspendida. Para evitar que dichos contaminantes ingresen a la cisterna de almacenamiento, el sistema debe considerar la instalación de un conductor del primer lavado (en inglés “FirstFlush”), el cual dirige el primer flujo de la escorrentía generada a un tubo dispuesto en forma vertical (Figura 93), el cual deberá vaciarse después de cada tormenta. El sistema es bastante sencillo y trabaja en forma tal que, una vez lleno el tubo, el agua comienza a fluir hacia la cisterna de almacenamiento principal, siendo sellado mediante una pequeña bola plástica

que flota hasta que el nivel del agua llega a su tope. En cuanto al volumen del tubo, se recomienda 3 litros por cada 5 m² de superficie de almacenamiento. Por esta razón, se aconseja subdividir el área de captación e instalar más de una cisterna, para así asegurar una buena calidad del agua capturada. Además, es importante recordar al lector que los conductores del primer lavado deben limpiarse (vacíarse) después de cada tormenta.

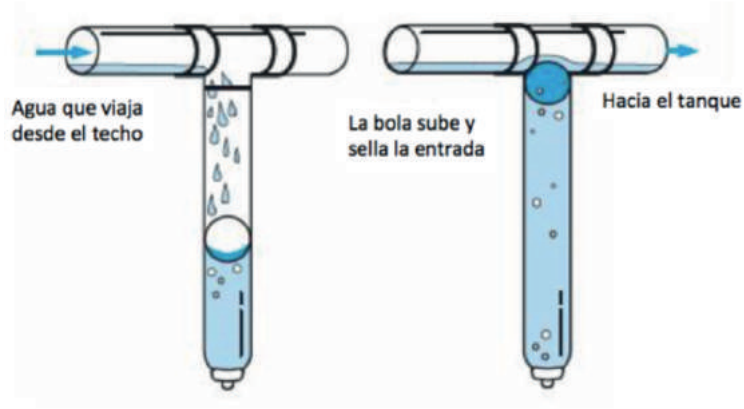


Figura 93. Los elementos no deseados que son transportados en el primer lavado se almacenan en un contenedor preliminar, el cual es un tubo vertical. Una vez lleno, la escorrentía sobrante se dirige al tanque de almacenamiento principal, gracias a la obstrucción de una bola flotante. Fuente: www.diyplumbingadvice.com.

Para eliminar los residuos que se depositan sobre el techo, es necesario instalar una serie de *filtros* que eliminan dichas basuras, evitando que estas lleguen al tanque de almacenamiento. Las barreras para mantener los residuos fuera de un SCALLs están representadas por pantallas o redes que atrapan las hojas a lo largo de la canaleta (Figura 94). Los filtros foliares son por lo general pantallas de malla de ¼ de pulgada, en marcos de alambre que se ajustan a lo largo de la longitud de la canaleta. Sin embargo, dichos filtros suelen ser necesarios solo en techos ubicados cerca de árboles. Dependiendo de la cantidad y el tipo de hojarasca, y la acumulación de polvo, el propietario puede tener que experimentar para encontrar el método que mejor se adecua a su situación en particular.



Figura 94. Es imprescindible evitar que las hojas depositadas en los techos entren al sistema de transporte y almacenamiento. Para esto, se deben instalar filtros en distintos puntos de la red de drenaje (Fuente: www.gumleafgutterguard.com.au).

El tanque o *cisterna de almacenamiento* es el componente más costoso de un SCALL. Entre las cisternas de almacenamiento más populares para zonas de escasa pluviometría (suroeste de los Estados Unidos) se encuentran las cisternas galvanizadas (Figura 95, izquierda), ya que no requieren de mano de obra especializada, son portátiles, fáciles de instalar, duraderas, se pueden conectar a cisternas adyacentes si se desea, y son visualmente atractivas.

Sin embargo, las cisternas de PVC (Figura 95, derecha) o similares, son más populares en ambientes húmedos.

Independientemente del material, el tamaño de la cisterna está sujeto a diversas variables, tales como la precipitación local, el tipo de tormentas, la demanda de agua, la duración prevista de los períodos sin lluvia, el área de la superficie de captación, la estética, la preferencia personal y el presupuesto. Además, hay ocasiones en que conviene tener dos o más tanques pequeños, en comparación a uno de mayor envergadura, como ya se ha mencionado, debido a que de este modo se pueden irrigar distintas áreas del jardín, sin la necesidad de tener mangueras extremadamente largas. En forma similar, en ocasiones es más conveniente almacenar el agua en un tanque subterráneo, para así utilizar el terreno sobre este para otros propósitos (terrenos pequeños), o para evitar los efectos del clima.



Figura 95. Los tanques más utilizados para la elaboración de SCALLs urbanos en Estados Unidos son de metal corrugado en ambientes áridos (izquierda) y plástico duradero en climas más húmedos (derecha). Fuente: southernarizonaraingutters.com y www.watercache.com.

Los tanques deben estar ubicados lo más cerca posible de los puntos de oferta y de demanda, con el fin de reducir el transporte de agua a distancia. Asimismo, deben estar protegidos de la luz directa del sol; es decir, si se mantiene el agua almacenada en la oscuridad absoluta, el agua podrá mantenerse por largos períodos y sin la presencia de algas. Por diferencias de presión, mientras más alto sea el techo o superficie de captación, más alto podrá posicionarse la cisterna, lo que se traduce en menos energía necesaria para utilizar el agua almacenada y satisfacer los usos que quiera dársele. En general, si se trata de la irrigación de una huerta por métodos de baja demanda energética (riego por inundación), el tanque puede posicionarse sobre el suelo.

Como es de suponer, la boca de entrada debe posicionarse a una altura menor que la de las canaletas que drenan el agua que escurre desde el techo. En este sentido, para compensar las pérdidas por fricción en la línea de drenaje e incrementar la energía hidráulica del sistema, es preferible una diferencia de, al menos, un metro entre las canaletas y la boca de entrada del tanque. Similarmente, el nivel máximo del agua a almacenar no debe sobrepasar bajo ninguna circunstancia la altura de las canaletas (Macomber, 2001). Es importante mencionar que en donde la precipitación escasea, la acumulación de sedimentos y polvo en el fondo de la cisterna puede a veces representar un problema. Por esto, se recomienda limpiar el fondo una vez al año, justo antes del inicio de la temporada de lluvias.

En cuanto al sistema de plomería, este depende del tipo de cisterna propiamente tal. Una cisterna de PVC simplemente viene con una boca superior (entrada del agua de lluvia) y una boca inferior (en donde se instala el grifo). Sin embargo, en zonas áridas lo que se prefiere es la cisterna galvanizada, pues ésta permite el lavado de sedimentos acumulados, si fuese necesario (muy común en ambientes desérticos). Así, la plomería de una cisterna galvanizada se basa en una base de cemento, en la cual se instalan cuatro tubos: un tubo de entrada, un tubo de rebalse, un tubo de lavado, y un tubo de salida (grifo), como se indica en la Figura 96.



Figura 96. Sistema de plomería de una cisterna galvanizada, el cual involucra un tubo de entrada, un tubo de rebalse, un tubo de limpieza y un grifo de salida. Una vez instalada la cisterna y secado el concreto, se finaliza el trabajo con la aplicación de un sellante no tóxico. Fuente: Southern Arizona Rain Gutters (www.southernarizonaraingutters.com).

10.5.2. Sistemas de captación de agua de lluvia en áreas verdes comerciales y residenciales, estacionamientos y calles

La captación de agua en jardines contempla la captura, transporte y almacenamiento de la escorrentía superficial generada por la lluvia, con el fin de irrigar árboles, arbustos y hierbas dentro del jardín, evitando que ésta salga de la propiedad e incentivando su infiltración dentro de los horizontes del suelo (Figura 97). El principio es también aplicable en paisajes de gran escala, tales como parques, escuelas, locales comerciales, estacionamientos y complejos de apartamentos, así como los pequeños paisajes residenciales. De hecho, existen muchas oportunidades de captación de agua de lluvia en áreas urbanizadas, en donde incluso jardines muy pequeños pueden beneficiarse del almacenamiento de agua bajo este principio. Además, la captura de la escorrentía superficial puede incorporarse fácilmente dentro del diseño de un nuevo jardín.

Un sistema de acumulación de agua de lluvia en una zona residencial o comercial tiene tres componentes principales: la oferta (precipitaciones), la demanda (requisito de agua del paisaje) y el sistema que transporta el agua a las plantas. El almacenamiento es un elemento adicional en este tipo de sistemas y es opcional. A diferencia del caso anterior, en un sistema de este tipo el agua de lluvia se utiliza inmediatamente. La mayoría de los propietarios de viviendas pueden diseñar sistemas sencillos de captación de agua para satisfacer las necesidades hídricas de las especies que se encuentran dentro de su propiedad. El diseño de sistemas de captación de agua de lluvia en construcciones nuevas, permite que el propietario pueda incorporar aspectos más detallados y completos para el desarrollo del sistema.

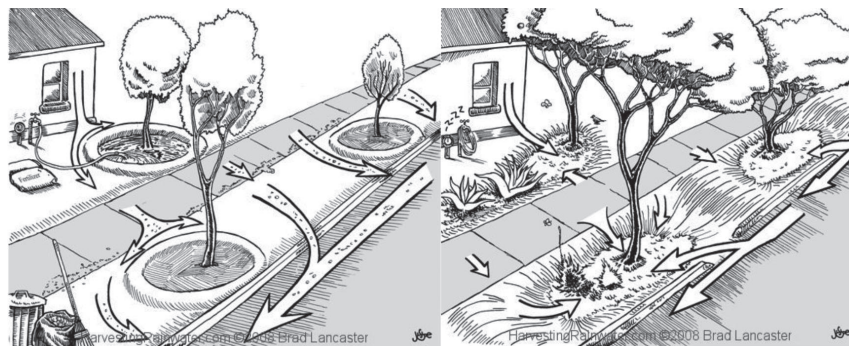


Figura 97. Principios básicos para el diseño de un sistema de captura de aguas lluvias en jardines y calles. Imágenes cortesía de Brad Lancaster (www.HarvestingRainwater.com).

Un sistema de este tipo por lo general consta de un área de captación y un medio de distribución, el cual opera por gravedad. El agua se deposita en una zona de retención dentro del paisaje, por ejemplo una zona cóncava o un área plantada en donde se almacena el agua, la cual puede ser utilizada inmediatamente por las plantas, o bien

acumulada en el suelo hasta la llegada de la estación de crecimiento (primavera y verano). Del mismo modo, es muy común en el suroeste de Estados Unidos la improvisación de sistemas que coinciden con los depósitos de aguas grises dentro de la propiedad, es decir, se tiende a que las aguas grises se acumulen en las mismas zonas de captura pluvial antes mencionadas.

De este modo, la escorrentía es generada sobre techos, áreas pavimentadas o la superficie del suelo. Un buen ejemplo de un sistema de este tipo es el agua que gotea desde el borde de un techo, la que cae sobre un área plantada o un canal de desviación, ubicados directamente debajo del borde de este. La gravedad transporta el agua adonde se desea utilizar.

El sistema de distribución conecta la zona de captación con la zona de almacenamiento. Así, los sistemas de distribución dirigen el flujo de agua y pueden ser simples o sofisticados. Por ejemplo, las canaletas de un techo direccionan el agua a una zona de retención junto a la casa; o las aceras que suavemente inclinadas, pueden distribuir el agua a un área adyacente plantada con vegetación ornamental. Los terrenos inclinados proporcionan una situación perfecta para el agua en movimiento, desde una zona de captación a una zona de almacenamiento. Del mismo modo, la construcción de canales, zanjas y cunetas son alternativas viables para transportar el agua a las zonas del jardín que necesiten irrigación.

Las áreas destinadas para el almacenamiento del agua transportada, son aquellas en donde se ubican o ubicarán las especies vegetales que se desea irrigar. Estas zonas, por lo general, son depresiones dentro del terreno que se excavan a mano o mediante el uso de maquinaria y se encuentran plantadas con especies arbóreas, arbustivas o herbáceas; justamente ahí es donde el agua capturada se infiltra en el suelo. Por lo general, el volumen de suelo excavado se utiliza para reforzar los bordes del área de almacenamiento. Además, una zona de almacenamiento puede ser diseñada para llenarse y luego fluir hacia otras depresiones ubicadas más abajo, mediante micro canales o similares.

Mediante la simple observación del paisaje durante una tormenta, es posible advertir los patrones de drenaje existentes en una propiedad, e identificar además los puntos bajos y puntos altos del sitio en cuestión. De este modo, se pueden utilizar estos patrones de drenaje para transportar el agua desde las zonas de captación a las zonas de almacenamiento. Como ya se ha mencionado, también se puede aprovechar la escorrentía generada en techos, zonas impermeables como asfalto y concreto, y prácticamente cualquier zona en pendiente, para direccionar el agua hacia las zonas de almacenamiento. Además, la instalación de terrazas, es decir, zonas de terreno con pendiente nula, que se ubican en aquellas porciones del terreno que se encuentren inclinadas, constituye un sistema de captura y almacenamiento de agua de lluvia.

A pesar de lo anterior, la recolección de agua de lluvia no solo implica techos y jardines públicos y privados; otro concepto de recolección de aguas pluviales muy popular en los Estados Unidos es la *infraestructura verde* (Green Infrastructure), que se refiere a las prácticas de captación de agua de lluvia proveniente de veredas y calles, frente a las propiedades privadas. Proyectos de infraestructura verde involucran movimientos de tierra para almacenar la escorrentía generada durante las tormentas, la que es desviada mediante cortes en las bermas (Figura 98).



Figura 98. La escorrentía que fluye por las calles durante las tormentas, se desvía hacia las zonas de acumulación mediante el corte de la berma. Imágenes cortesía de Brad Lancaster (www.HarvestingRainwater.com) y Watershed Management Group (www.watershedmg.org).

La infraestructura verde siempre involucra especies nativas arbóreas, arbustivas y herbáceas (generalmente plantas con flores), rastrojos vegetales (mulch) para el control de la evaporación durante períodos secos, y abonos orgánicos. Además, rocas y gravilla se utilizan para minimizar la erosión y así mantener la estabilidad de la estructura (Figura 99). Algunos ejemplos de infraestructura verde se ilustran en la Figura 100.

Por otra parte, ya sea en malls comerciales, en una fábrica, un restaurant, un condominio o una iglesia, por nombrar algunas instalaciones, los estacionamientos se caracterizan hidrológicamente por generar inmensos volúmenes de escorrentía durante las tormentas. Por lo general, dichos volúmenes son dirigidos a las vías de evacuación de aguas lluvias. Sin embargo, gracias a la expansión urbana y los cambios en los patrones de precipitación, dichos acueductos por lo general colapsan, en algunos casos incluso durante tormentas menores. Esto ha representado un problema serio en Estados Unidos, por lo que muchos condados en la actualidad, obligan a establecer piscinas de retención de la escorrentía generada en los estacionamientos.



Figura 99. La infraestructura verde involucra la construcción de depresiones en la zona comprendida entre la calle y la propiedad privada, con el fin de dirigir el agua de lluvia que fluye por las calles. Imágenes cortesía de Watershed Management Group (www.watershedmg.org).



Figura 100. Vista antes y después de la aplicación de la metodología de infraestructura verde junto a rutas peatonales impermeables, donde el agua de las tormentas no logra llegar a la calle, sino más bien se queda en el lugar de origen. Imágenes cortesía de Brad Lancaster (www.HarvestingRainwater.com).

Para hacerse una idea, un estacionamiento de concreto de 2.5x3 metros puede generar más de 370 litros de escorrentía, solo durante una tormenta de 25 milímetros. Esta pequeña área, sumada a miles de otros estacionamientos, generan millones de metros cúbicos que van a parar al río principal de la ciudad y luego al mar (para el caso de Chile).

Sin embargo, en Estados Unidos se ha aprovechado esta oportunidad (la presencia de piscinas de retención de la escorrentía) para aplicar el concepto de infraestructura verde y así utilizar dicha escorrentía para establecer especies arbóreas, arbustivas y herbáceas dentro y junto a las plazas de estacionamiento (Figura 101). Se ha comprobado que

esta práctica disminuye notablemente no solo los volúmenes de escorrentía que se deben evacuar a través de los acueductos, sino que también la temperatura general del área, mediante el efecto isla proporcionado por los árboles.



Figura 101. La escorrentía generada en las plazas de estacionamientos en Estados Unidos, se ha traducido en el establecimiento de miles de áreas verdes sin la necesidad de riego. Imágenes cortesía de Brad Lancaster (www.HarvestingRainwater.com).

11.- SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS EN CHILE

Alejandro Abarza Martínez.

Coordinador de Riego y encargado del Programa Sistemas de Captación y acumulación de Aguas Lluvias, SCALLs.
Departamento de Riego, INDAP Región del Maule.

Rodrigo Garrido Sánchez.

Jefe de la Unidad de Riego, INDAP Región del Maule.

Jairo Ibarra González.

Director Regional INDAP Maule.

11.1. Desarrollo de sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias (SCALLs), llevados a cabo por el Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP, con fines agrícolas

Actualmente, el desarrollo de la actividad agropecuaria en la Región del Maule se enfrenta a un escenario cada vez más complejo. Por una parte, la disminución de las precipitaciones y su distribución temporal, generadas por el cambio climático, impiden una mayor acumulación de agua durante el invierno; mientras que por otra, existe insuficiente infraestructura para gestionar el agua de riego. En virtud de ello, en la temporada 2013/2014, 13 comunas fueron declaradas “zonas de escasez hídrica” por la Dirección General de Aguas (DGA). Los territorios más afectados se ubican en las zonas de secano (interior y costero) y la pre cordillera; mientras que los principales rubros involucrados son la ganadería ovina y bovina, los cultivos tradicionales, las hortalizas y las flores entre otros.

La superficie regada en la Región del Maule bajo sus distintas modalidades, alcanza las 299.059,80 ha., lo que representa un 52% del total de la superficie cultivada de la Región. El sistema de riego más utilizado es el gravitacional, representando el 85.5% del total de la superficie regada regional.

Dentro del porcentaje de superficie bajo riego, hay un grupo importante de agricultores (as) cuyas aguas no alcanzan para cubrir los ciclos productivos, y merman significativamente en los meses de Enero a Marzo.

El Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP) de la Región de Maule, ha querido abordar esta problemática y hacer frente de manera decidida a los efectos que el cambio climático ha traído consigo. Es así, que a partir del 2014 se inició la implementación de obras tendientes a generar y aumentar la oferta de agua en sectores con déficit hídrico y con nula infraestructura de riego intrapredial y extrapredial.

El programa de Construcción de Sistemas de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias (SCALLs), ha permitido incrementar la disponibilidad hídrica en periodos estivales, logrando satisfacer de mejor forma la demanda de agua para riego, abastecimiento de consumo animal e incluso para uso doméstico.

A partir del año 2014, se ha apoyado la implementación de los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias para la pequeña agricultura, a través de los Programa de Riego Intrapredial (PRI) y el Programa de Obras Menores de Riego (PROM), ayudando a los pequeños propietarios rurales con recursos de fomento productivo no reembolsables, que alcanzan hasta un 95% de la inversión. El foco de atención ha estado puesto en las familias que desarrollan agricultura de auto consumo y que se localizan en sectores con un déficit hídrico importante en la región.

Por otra parte, la tecnología implementada se basa en el trabajo desarrollado por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) de la Universidad de Talca (Unesco, 2015), que, por medio de un proyecto financiado por el Gobierno Regional del Maule, logró desarrollar 12 unidades demostrativas ubicadas en distintas localidades de la Región. Esto con el fin de evaluar diferentes materiales en la zona de captación y de observar los volúmenes de acumulación, que fluctuaron entre los 20 y los 50 m³.

Toda la información desarrollada en la investigación realizada por el CTHA, no solo ha sido relevante para la implementación de estas tecnologías de acumulación de agua en la pequeña agricultura, sino que también ha servido como proceso de aprendizaje. En tal sentido, parte de este proceso de aprendizaje ha significado efectuar mejoras que han apuntado principalmente al aumento del volumen de acumulación, como también a un aprovechamiento mayor de las posibilidades que ofrece el sistema productivo y doméstico rural. Así por ejemplo, se han empezado a utilizar las infraestructuras existentes en cada unidad productiva como nuevas zonas de captación. Techos de viviendas, galpones y bodegas son algunos ejemplos de ello. Todos estos cambios no sólo han permitido disminuir los costos, sino que también han traído consigo un aumento del volumen de acumulación de agua y por ende, una mayor seguridad de riego.

Otro elemento considerado en el desarrollo y ejecución de esta tecnología y que es de vital importancia debido a que le da el sustento a las dimensiones de la obra, es la caracterización y diseño hidrológico utilizado; esto significó considerar registros de precipitación disponibles de las estaciones meteorológicas cercanas a los sectores en donde se emplazaron los Sistemas de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias, Scalls. Para ello, se estudiaron 9 estaciones con series de datos que van de los 20 a los 35 años, a las cuales se les realizaron los tratamientos estadísticos, principalmente un ajuste de los datos con la Función de Distribución de Probabilidad Gumbel y finalmente, las pruebas de bondad de ajuste.

Hasta la fecha, a través de los programa de riego de INDAP, se han implementado 28 SCALLs, ubicados en las comunas de Constitución, Curepto, Empedrado, Maule, Pelarco, San Clemente, San Javier, San Rafael y Vichuquén. Los sistemas implementados poseen un volumen de acumulación que va desde los 50 a los 200 m³. Las zonas de captación utilizadas han sido laderas de cerros, techos de casas, galpones y la propia zona de acumulación. La inversión realizada a la fecha es de 140 millones de pesos (Aproximadamente US\$ 200.000).

11.1.1. Desarrollo y evolución de los sistemas de captación y acumulación de aguas lluvias (SCALLs) en la pequeña agricultura

Los sistemas de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias (SCALLs), han tenido una evolución respecto al diseño implementado por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA), tanto en su volumen de acumulación, como en la infraestructura de captación utilizada.

Los componentes que sustentan a los Sistemas de Captación y Acumulación de aguas lluvias, implementados por el INDAP, son los siguientes:

- a. Área de Captación. En ladera, techo de la vivienda, galpón, bodega y techumbre del propio acumulador.
- b. Sistema de Conducción.
- c. Sistema primer lavado.
- d. Área de acumulación.
- e. Obras de mitigación.

a. Área de Captación

Se denomina área de captación a la superficie o zona sobre la cual cae la lluvia. En el año 2014 se realizaron las primeras captaciones de aguas lluvias utilizando laderas de cerros, las cuales se impermeabilizaron con geomembrana de 1 mm de espesor. La superficie utilizada fluctuaba desde los 136 a 153 m², para una precipitación de diseño de 400 mm, obtenida a través de la función de distribución de probabilidad de Gumbel. Desde el año 2015 a la fecha, se ha utilizado como área de captación la infraestructura existente en cada unidad predial, sean estos techos de las viviendas, galpones, bodegas y la techumbre del propio acumulador. Esto ha permitido una reducción importante no solo en los costos, sino también en los tiempos asociados a la ejecución del proyecto. Además, ha permitido la ejecución de este tipo de proyectos en zonas, que en forma natural, no poseen las condiciones para impermeabilizar un área de captación.

En los apartados siguientes se dará a conocer un análisis de costos.

Para el área de captación, se han considerado los siguientes materiales:

a.1) Área de captación en ladera de cerro

- ✓ Geomembrana de 1 mm de espesor HDPE de alta densidad.
- ✓ Polines impregnados 3 a 4 pulgadas
- ✓ Madera impregnada 2 x 3".
- ✓ Tubería PVC 110 mm, para coronar los listones de madera.
- ✓ Barreno.



Figura 102: área de Captación en ladera. Sector González Bastías, comuna de San Javier.



Figura 103: área de Captación en ladera. Sector Huilliborgoa, comuna de San Rafael.

a.2) Área de captación en techos

Para estos casos se utilizaron áreas de captación que fluctuaron entre los 102 a 300 m². Estas superficies están determinadas en precipitaciones de diseño que van de los 394 a los 572 mm por año. Los valores obtenidos en las precipitaciones de diseño dependen de la zona de emplazamiento del sistema, así como del volumen de acumulación requerido.

Materiales Considerados:

- ✓ Techumbre de Zinc existente.
- ✓ Canaletas de agua lluvia, 125 mm.
- ✓ Tapa canal PVC.
- ✓ Adhesivo PVC.
- ✓ Soporte PVC para canaletas 125 mm.
- ✓ Unión canal PVC.
- ✓ Tornillo roscalata.
- ✓ Tapacán Cepillado 1"x 5"
- ✓ Clavos de 2 1/2 pulgada.



Figura 104 área de Captación en techo del acumulador. Sector Colmenares, Comuna de Empedrado.

Figura 105: área de Captación en techo de la vivienda. Sector Colmenares, Comuna de Empedrado

b. Sistema de Conducción

Corresponde a la tubería que conduce el agua desde la zona de captación hasta la zona de acumulación. Si la zona de captación es en ladera de cerro, la tubería a considerar es HDPE, o bien, si la zona de captación son techos, se deben utilizar bajadas de agua de PVC y tuberías en PVC y HDPE. En todos los casos, el diámetro utilizado es de 110 mm.



Figura 106: conducción Scalls Sector Colmenares.



Figura 107: conducción Scalls sector Junquillar, Empedrado.

c. Sistema primer lavado

Es un sistema de prelavado que se incorporó como parte de un plan de mejoras a contar del año 2015 y que sigue la línea de conducción de agua desde el acumulador. Tiene por finalidad eliminar el polvo depositado sobre el área de captación, que es arrastrado por la primera lluvia hacia la zona de acumulación. Funciona en forma manual y consta de una llave que desvía el agua, antes de que esta entre al acumulador.

Materiales considerados

- ✓ TeePvc 110 x 50 mm.
- ✓ Válvula de bola Pvc Cementar 4".
- ✓ Válvula de bola 1 ½".
- ✓ Adhesivos.



Figura 108: tuberías de sistema de lavado



Figura 109: tuberías de sistema de lavado

d. Área de acumulación

Es la zona que está determinada para almacenar la lluvia y debe ser lo suficientemente grande como para suplir o complementar las demandas de agua del cultivo. Por tanto, el volumen estará directamente relacionado con la demanda real de agua del cultivo y de la posibilidad de disponer o no de un segundo aporte hídrico, que por lo general se trata de alguna vertiente existente en el sector y que por años ha sido utilizada, pero que legalmente no puede ser respaldada su propiedad.

El acumulador puede ir bajo tierra, con volúmenes de 50 a 200 m³ de capacidad, revestidos con geomembrana HDPE de 1 mm de espesor termo fusionada, o sobre el suelo utilizando un tanque flexible de PVC con volúmenes de 50 m³ de capacidad. Actualmente solo se utiliza la primera modalidad por ser más económica. En los apartados siguientes se dará un análisis comparativo de costos entre la geo membrana y el tanque flexible.

Otro elemento que forma parte del acumulador, es la techumbre que lo cubre, cuyo objetivo es mantener la calidad del agua almacenada. La techumbre utilizada está conformada por cerchas de dos aguas de acero galvanizado liviano, marca metalcon. En su parte superior se colocaron costaneras de acero galvanizado tipo Omega, las que permiten colocar la cubierta de planchas de zinc Alum 5 V de 0,3 mm. Además, debe contar con una escotilla para permitir su limpieza y reparaciones si fuese necesario

En cuanto a los criterios utilizados para emplazar el área de acumulación, se deben considerar los siguientes:

- ✓ Área libre de piedras y rocas que pudiesen dañar la geomembrana.
- ✓ Área sin presencia de napa freática.
- ✓ La instalación del acumulador debe estar sobre la cota de la zona de riego de manera de utilizar la diferencia de altura para la conducción del agua. En casos excepcionales se ha dispuesto ubicar el área de captación a nivel o bajo cota, pero en este caso es necesario un sistema de bombeo auxiliar.



Figura 110: área de acumulación en Geomembrana de 1 mm de espesor.



Figura 111: área de acumulación en base a un tanque flexible. Sector Huilliborgoa San Rafael

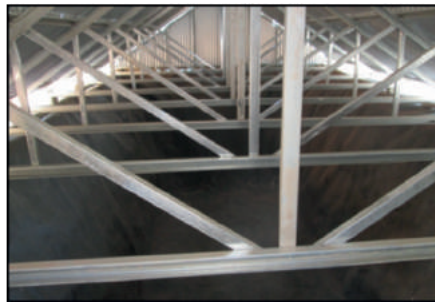


Figura 112: área de acumulación con cubierta de techo. Cerchas en metalcon.

e. Obras de mitigación

Estas obras fueron recientemente incorporadas en los SCALLs ejecutados a contar del año 2015, en virtud del seguimiento efectuado a aquellos proyectos que presentaban un área de captación en laderas de cerro, en las que se observó que algunos cursos pequeños de agua lluvia ingresaron al área de captación con el consiguiente arrastre de material a la zona del perímetro del acumulador. Esto puede ser un peligro ante futuros deslizamientos del área de captación y de socavones en torno al acumulador, hecho que queda demostrado en lo ocurrido en proyectos que se establecieron en las comunas de Vichuquén y San Javier. Para mitigar estos efectos, actualmente se contemplan zanjas o pequeños canales de desviación de agua lluvia en torno al perímetro del acumulador o zona de captación. Estas son obras de baja complejidad, las cuales pueden realizarse con maquinaria o a mano.



Figura 113: obra de mitigación en la parte alta del Talud. Retiro del material y compactado.



Figura 114: el trabajo con maquinaria remueve mucho material y deja muy expuesto el terreno. Esto facilita la entrada de agua a la zona de acumulación, pudiendo generar un socavón por todo el perímetro de la unidad, como ocurrió en 2014 en el Sector Rarín.

11.1.2. Algunas consideraciones para el diseño y construcción del Scalls

a. Precipitación de diseño en el lugar donde se emplazará el Scalls

Para la precipitación de diseño del Scalls en cada uno de los sectores focalizados del 2014 a la fecha, se tomaron como referencia datos de precipitación anuales de las estaciones más cercanas dispuestas por la Dirección General de Aguas (DGA) y de la Dirección Meteorológica de Chile. Se utilizaron series de registros mayores o iguales a 20 años. Con la información obtenida de cada una de las estaciones seleccionadas se realizó la caracterización hidrológica de cada zona, lo que implicó selección de las estaciones, tratamientos estadísticos, definición de los estadígrafos de precisión, ajuste de los datos con una función de distribución, pruebas de bondad de ajuste y finalmente, el diseño hidrológico de las obras de captación, acumulación y conducción.

La información utilizada para el diseño de los 28 SCALLs ejecutados se describe en la tabla adjunta.

Tabla 14: estaciones de referencia utilizadas en los diseños hidrológicos de los SCALLs implementados en INDAP Región del Maule. Período 2014 – 2016.

Estación de Referencia	Comuna de Aplicación	Serie de Datos (años)	Pp de Diseño (mm)
Nirivilo	San Javier – Empedrado	35	452.48
Constitución	Constitución	22	433
Gualleco	Curepto	35	476.33
San Rafael	San Rafael (Huilliborgoa)	35	400
Ranquil	Vichuquén	33	400
Río Claro en Rauquén	Maule (Colín)	20	394.75
Huerta de Maule	San Javier - Empedrado	23	397.64
Melozal	San Javier	35	483.63

b. Disponibilidad de infraestructura o terreno para establecer el área de captación y acumulación

Un elemento diferenciador a la hora de focalizar este tipo de proyectos, es determinar en terreno la superficie o infraestructura que se cuenta como área de captación. Esto significa saber, por ejemplo, que si la captación es en techos, se debe determinar si estos están en buenas condiciones y cercanos a la zona de acumulación, de manera de no incurrir en gastos adicionales que impliquen un aumento en los costos de ejecución.

Para el caso de la captación en laderas, es preciso definir si la zona posee una buena accesibilidad para la maquinaria, y si está libre de troncos, árboles y rocas, que pudieran impedir la ejecución de la obra. Las mismas consideraciones se deben tener para seleccionar el lugar de emplazamiento del acumulador.

c. Oferta de agua disponible en la unidad predial

En el caso de la experiencia de Indap, se priorizaron para la instalación de los SCALLs, aquellos sectores donde no existía una cantidad de agua suficiente para las demandas presentes o la disponibilidad era muy esporádica o cuya propiedad no se podía acreditar.

Esta es una variable que determina el volumen del acumulador, ya que en los casos donde la única oferta de agua es la lluvia y existen las condiciones óptimas para emplazar la zona de captación, el proyecto apuntará a maximizar el volumen de acumulación. Esto se hace considerando que las lluvias caen en forma concentrada hasta mediados de Septiembre y por tanto, desde ese período a finales de Marzo no hay aporte alguno de agua, período en el cual se concentra el período de riego de los cultivos.

Por otra parte, si existiese alguna oferta de agua adicional, como es el caso de una vertiente que estuviese disponible y que permitiese complementar el aporte de agua en el acumulador, sobre todo en los períodos críticos de riego, se optó por considerar para estos casos la construcción de un acumulador de menor volumen.

Un factor a considerar en el volumen acumulado es la demanda real del cultivo, sobre todo considerando el mes de mayor demanda hídrica, que corresponde al mes de Enero.

d. Demanda real de agua del cultivo

Una variable a considerar es la siembra y la superficie de riego, ya que definido esto, se podrán estimar las demandas de agua del cultivo, lo que determinará los volúmenes de acumulación de agua proyectados. Los sistemas implementados están pensados para familias rurales y su autoconsumo, con un pequeño margen destinado a comercialización a través de circuitos cortos a nivel local. Por ende, no es posible pensar que con el agua acumulada en un volumen por ejemplo de 100 metros cúbicos, sea posible regar 1 ha de cultivo. En este caso la idea es contribuir con agua para el riego en superficies no mayores a 150 m², con un aporte del 100% de agua lluvia.

En relación a las superficies de riego, estas están orientadas en su gran mayoría a cultivos de hortalizas en invernadero con sistemas de riego eficiente como lo es el goteo y la cinta, con un 90% de eficiencia. Asimismo, al momento de determinar los consumos diarios de agua de los cultivos desarrollados en cada uno de los sectores donde se intervino con un SCALLs, se acudió a boletines técnicos del Centro de Información de Recursos Naturales, la Comisión Nacional de Riego e información de universidades, de manera de utilizar la literatura existente a la hora de aplicar los conceptos de la Evapotranspiración del Cultivo, ETC; la evapotranspiración potencial, Etp; y el Kc que corresponde al Coeficiente de cultivo.

11.1.3. Definiciones y Fórmulas relacionadas con las demandas de riego

Evapotranspiración del cultivo, ETC: es la cantidad de agua removida desde el suelo y desde la planta por transpiración vegetal. Esta puede determinarse a partir de la evapotranspiración potencial (o evapotranspiración del cultivo de referencia).

$$ET_c = E T_p * K_c$$

Donde Kc es un coeficiente de cultivo adimensional que varía con el cultivo y su desarrollo vegetativo. Las unidades de medida de ETC y la ETP se pueden trabajar en mm/día, mm/mes o mm/temporada.

Respecto de los valores de Etp utilizados para determinar el volumen de agua anual en cada una de las unidades ejecutadas de SCALLs, se tomó como referencia las tablas de la Comisión Nacional de Riego y las de Ciren (1997), relativas a las Etp promedio mensual para el secano interior y costero de la Región del Maule. Los valores utilizados para cada sector en particular se enuncian en la tabla adjunta.

Tabla 15: evapotranspiración potencial mensual (mm/mes) y diaria (mm/día) para el secano costero e interior
Valores citados (Universidad de Concepción, 2012).

Comunas	ENERO	
	Etp Mensual	Etp diaria
Vichuquén	147	4.74
Constitución	141	4.55
Curepto	152	4.90
Talca	193	6.23
Maule	196	6.32
Empedrado	172	5.55
San Javier	196	6.32

Requerimientos de Agua con sistemas de riego Goteo – Cinta

$$ETc = ETp * Kc \left[P + \frac{1}{2} (1-P) \right]$$

en donde;

ETp : Evapotranspiración potencial (mm/día).

Kc : Coeficiente de cultivo.

P : Factor de cobertura o sombreoal mediodía (0 < P < 1).

La ecuación anterior es válida para valores de cobertura o sombreamiento mayores al 50% (P > 0.5). Si P < 0.5, o bien para árboles pequeños de entre uno a tres años y con el propósito de considerar el efecto de microadvección producido en el entorno de la planta, se recomienda:

$$ETc = ETp * Kc$$

Volumen de agua requerido por árbol o planta

$$Va = ETc * Sp * Sh$$

En donde;

Sp: espaciamiento de los árboles o plantas en la hilera (m).

Sh: espaciamiento entre hileras (m).

Considerando que los métodos de riego no permiten aplicar el agua con una eficiencia del 100%, el volumen total a aplicar por árbol o planta (Vt) será:

$$Vt = Va/Ea$$

en donde Ea es la eficiencia de aplicación del agua de riego (0 < Ea < 1).

Tabla 16: coeficientes de cultivo Kc para diversos cultivos y estados de desarrollo.

Cultivo	Porcentaje de la estación de crecimiento					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
	Establecimiento Inicio	Desarrollo del cultivo	Media estación	Inicio madurez	Madurez fisiológica	
Alfalfa	0.3-0.4	-----	promedio	1.10-----	-----	
Avena-Trigo primavera	0.3-0.4	0.70-0.80	1.00-1.15	0.6-0.7	0.20-0.25	
Empastada	0.3-0.4	-----	promedio	1.00-----	-----	
Remolacha	0.25-0.4	0.60-0.70	0.90-1.10	0.90-1.10	0.80-0.90	
Papas	0.40-0.50	0.70-0.80	1.00-1.20	0.95-1.00	0.65-0.75	
Tabaco	0.30-0.40	0.70-0.90	1.00-1.20	0.90-1.00	0.75-0.85	
Maíz	0.30-0.50	0.70-0.85	1.00-1.20	0.80-0.95	0.50-0.60	
Frejol verde	0.30-0.40	0.65-0.75	0.95-1.05	0.90-0.95	0.85-0.95	
Frejol grano	0.30-0.40	0.70-0.80	1.05-1.20	0.65-0.75	0.25-0.30	
Vid	0.30-0.50	0.60-0.80	0.80-0.90	0.6-0.8	0.5-0.7	
Frutales hoja caduca	0.40-0.50	0.75-0.85	1.10-1.20	1.10-1.20	0.7-0.90	
Cítricos y Paltos	0.60-0.70	0.60-0.70	0.80-0.90	0.80-0.90	0.60-0.70	
Frutales con cubierta verde	-----	promedio	1.00-----	-----	-----	
Arveja verde	0.40-0.50	0.70-0.85	1.05-1.20	1.00-1.15	0.95-1.05	
Pimentón	0.30-0.40	0.60-0.75	0.95-1.10	0.95-1.10	0.80-0.90	
Cebolla guarda	0.40-0.50	0.60-0.80	0.95-1.15	0.80-1.00	0.70-0.80	
Cebolla verde	0.40-0.50	0.60-0.75	0.95-1.10	0.95-1.10	0.95-1.10	
Tomates	0.30-0.40	0.60-0.80	1.10-1.25	0.80-1.00	0.60-0.80	
Sandía	0.40-0.50	0.70-0.80	0.95-1.05	0.80-0.95	0.65-0.75	
Melón, Zapallo	0.40-0.50	0.60-0.75	0.95-1.05	0.70-0.80	0.60-0.70	
Hortalizas arraigamiento superficial	0.30-0.40	0.60-0.75	0.90-1.10	0.90-1.10	0.80-0.90	

Valores recopilados a partir de James (1988), Millar (1993) y Stewart y Nielsen (1990), citados por Centro del Agua (2012).

Por tanto, en función de las fórmulas y definiciones descritas anteriormente, se está en condiciones de estimar la demanda real de agua de un cultivo específico regado con riego por goteo y bajo un abastecimiento de agua establecido por un SCALLS.

11.1.4. Ejecución, proyecciones y costos asociados a los diversos tipos de Scalls implementados

Desde el tercer trimestre del 2014 a la fecha, mayo de 2016, el Instituto de Desarrollo Agropecuario ha diseñado y construido 28 Sistemas de Captación y Acumulación de aguas lluvias. Así, se ha verificado en el transcurso de estos años una evolución respecto de los volúmenes a acumular, a cambios en la materialidad del área de captación y del subsistema de acumulación, además de la incorporación de elementos tendientes a mejorar la calidad del agua almacenada y a minimizar los procesos erosivos que ello conlleva.

Los diversos sistemas implementados hasta la fecha en la Región del Maule, tienen diferentes costos dados por la zona de captación y el volumen de acumulación. A continuación se detallan los costos de cada uno de los sistemas implementados.

Tabla 17: detalle presupuestario de la ejecución de un SCALLs con captación en ladera de cerro, con acumulación de 50 m³ en una excavación revestida con geomembrana cubierta con un techo. Año 2014.

PARTIDAS	UNID	CANTIDAD	V. UNIT	TOTAL
TRABAJOS PREVIOS				
Limpieza Terreno	gl	1	\$ 144.975	\$ 144.975
Replanteo, Trazados y Niveles	gl	1	\$ 254.791	\$ 254.791
OBRA GRUESA				
Escarpe	m ³	14	\$ 3.675	\$ 51.450
Excavación Área de Acumulación	m ³	51,75	\$ 3.675	\$ 190.181
Reubicación o retiro de material de excavación	m ³	61,74	\$ 3.675	\$ 226.895
Estructura Captación aguas lluvias madera impregnada	ml	49	\$ 3.990	\$ 195.510
GEOMEMBRANA				
Geomembrana área de Captación	m ²	230	\$ 1.958	\$ 450.340
Geomembrana área de Acumulación	m ²	158	\$ 1.958	\$ 309.364
Instalación geomembrana HDPE, termo fusión, extrusión	m ²	388	\$ 1.588	\$ 616.144
Tubería conducción área acumulación HDPE 110 mm	ml	6	\$ 5.194	\$ 31.164
TERMINACION				
Tubería Despiche HDPE 110 mm	unid	1	\$ 29.845	\$ 29.845
Tubería en 75 mm	unid	1	\$ 29.845	\$ 29.845
Válvula de salida	unid	1	\$ 34.896	\$ 34.896
Techumbre Tranque domiciliario rural	m ²	61	\$ 7.900	\$ 481.900
CIERRE PERIMETRAL				sub-Total
Cierre Perimetral c/ Polín impregnado 3" a 4", malla 5014	ml	78	\$ 6.790	\$ 529.620
Área de Captación de 147 m2.			Neto	\$ 3.576.920
			Utilid 10%	\$ 321.923
			G.G 5%	\$ 300.461
			Sub-Total	\$ 4.199.304
			Iva	\$ 797.868
TOTAL			Total	\$ 4.997.172

Tabla 18: detalle presupuestario de la ejecución de un SCALLs con captación en techocon acumulación en una excavación revestida con geomembrana y cubierta con un techo, para 50 m³. Año 2015 - 2016.

PARTIDAS	UNID	CANTIDAD	V. UNIT	TOTAL
CONSTRUCCIÓN ACUMULACIÓN				786.220
Excavación	m ³	55	\$ 2.300	\$ 126.500
Relleno de Tierra compactada	m ³	2	\$ 5.300	\$ 10.600
Manejo de material proveniente de excavación	m ³	68,9	\$ 800	\$ 55.120
Suministro e instalación de Geomembrana	m ²	165	\$ 3.600	\$ 594.000
ESTRUCTURA TECHUMBRE ACUMULADOR				\$ 661.870
Base montaje cerchas	c/u	1	\$ 36.370	\$ 36.370
Estructura de Techumbre, cerchas de metalcon	c/u	7	\$ 36.598	\$ 256.186
Costanera Perfil Omega	c/u	1	\$ 101.350	\$ 101.350
Cubierta Zinc Alum 0,3 mm	c/u	1	\$ 213.071	\$ 213.071
Caballete Galvanizado 30 cm	c/u	1	\$ 19.999	\$ 19.999
Frontones Zinc Alum 0,3 mm	c/u	1	\$ 34.894	\$ 34.894
CONDUCCIÓN Y AREA DE CAPTACIÓN (TECHO)				\$ 270.742
Canaletas aguas lluvias 125 mm (Tapa canal, Unión, Soporte,	ml	30	\$ 4.327	\$ 129.810
Tapacan Cepillado 1"x5"	ml	30	\$ 1.283	\$ 38.490
Bajada de aguas lluvias Pvc	c/u	1	\$ 6.476	\$ 6.476
Conducción Aguas lluvias al acumulador PVC San Gris 110 mm	ml	9	\$ 4.491	\$ 40.419
Sistema primer lavado	c/u	1	\$ 55.547	\$ 55.547
RED DE RIEGO				\$ 214.865
Tubería HDPE 50 mm	ml	50	\$ 3.840	\$ 192.000
Terminal HE Compresión HDPE	c/u	1	\$ 3.142	\$ 3.142
Válvula de compuerta	c/u	1	\$ 15.984	\$ 15.984
Codo Pvc 50 mm x90°	c/u	1	\$ 614	\$ 614
Terminal Espiga 1 1/2". Polietileno	c/u	1	\$ 3.125	\$ 3.125
OBRAS COMPLEMENTARIAS				\$ 515.000
Transporte Retroexcavadora	Nº	1	\$ 150.000	\$ 150.000
Fletes materiales	Nº	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Letrero de Obras	GL	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Replanteo Topográfico	GL	1	\$ 65.000	\$ 65.000
Construcción de cerco perimetral	ml	45	\$ 6.000	\$ 270.000
			Neto	\$ 2.718.697
			Utilid	
			10%	\$ 271.869
			G.G 5%	\$ 135.934
			Formul.	\$ 217.495
			Sub-Total	\$ 3.126.500
			Iva	\$ 594.035
TOTAL			Total	\$ 3.938.030

Tabla 19: SCALLs. Área de captación en techo, acumulación en una excavación revestida con geomembrana y cubierta con un techo, para 100 m³.

PARTIDAS	UNID	CANTIDAD	V. UNIT	TOTAL
CONSTRUCCIÓN ACUMULACIÓN				1.286.012
Excavación	m ³	123,8	\$ 2.300	\$ 284.740
Relleno de Tierra compactada	m ³	2	\$ 5.300	\$ 10.600
Manejo de material proveniente de excavación	m ³	158,34	\$ 800	\$ 126.672
Suministro e Instalación de Geomembrana	m ²	240	\$ 3.600	\$ 864.000
ESTRUCTURA TECHUMBRE ACUMULADOR				\$ 812.377
Base montaje cerchas	c/u	1	\$ 40.455	\$ 40.455
Estructura de Techumbre, cerchas de metalcon	c/u	9	\$ 36.598	\$ 329.382
Costanera Perfil Omega	c/u	1	\$ 130.151	\$ 130.151
Cubierta Zinc Alum 0,3 mm	c/u	1	\$ 253.454	\$ 253.454
Caballete Galvanizado 30 cm	c/u	1	\$ 24.041	\$ 24.041
Frontones Zinc Alum 0,3 mm	c/u	1	\$ 34.894	\$ 34.894
CONDUCCIÓN Y AREA DE CAPTACIÓN TECHO				\$ 496.503
Canaletas aguas lluvias 125 mm (Tapa canal, Unión, Soporte,	ml	50	\$ 4.327	\$ 216.350
Tapacan Cepillado 1"x5"	ml	30	\$ 1.283	\$ 38.490
Bajada de aguas lluvias Pvc	c/u	1	\$ 6.476	\$ 6.476
Conducción Aguas lluvias al acumulador	ml	40	\$ 4.491	\$ 179.640
Sistema primer lavado	c/u	1	\$ 55.547	\$ 55.547
RED DE RIEGO				\$ 55.159
Tubería HDPE 50 mm	ml	12	\$ 2.640	\$ 31.680
Terminal HE Compresión HDPE	c/u	1	\$ 3.142	\$ 3.142
Válvula de compuerta	c/u	1	\$ 15.984	\$ 15.984
Codo Pvc 50 mm x90°	c/u	2	\$ 614	\$ 1.228
Terminal Espiga 1 1/2". Polietileno	c/u	1	\$ 3.125	\$ 3.125
OBRAS COMPLEMENTARIAS				\$ 515.000
Transporte Retroexcavadora	N°	1	\$ 150.000	\$ 150.000
Fletes materiales	N°	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Letrero de Obras	GL	1	\$ 200.000	\$ 200.000
Replanteo Topográfico	GL	1	\$ 65.000	\$ 65.000
CONSTRUCCION DE CERCO PERIMETRAL				
Cierre Perimetral c/ Polín impregnado 3" a 4", malla 5014	ml	50	\$ 6.000	\$ 300.000
			Neto	\$ 3.465.051
			Utilid 10%	\$ 346.505
			G.G 10%	\$ 173.253
			Formulación	\$ 277.204
			Sub-Total	\$ 3.984.809
			Iva	\$ 757.114
TOTAL			Total	\$ 5.019.126

11.1.5. Análisis comparativo con otras materialidades a utilizar en la zona de acumulación

En cuanto a la materialidad utilizada en el área de acumulación, estos están determinados en función de los recursos y a los objetivos para el cual se pretende construir el SCALLs. En los casos de INDAP, los proyectos han tenido un propósito de riego y por tanto, la excavación revestida con geomembrana y cubierta con un techo, resulta ser el material más conveniente desde el punto de vista de precio en relación al estanque flexible o hidro acumulador, teniendo en promedio un costo de \$5.000.000 para volúmenes de acumulación de 100 m³. El costo del mismo escenario, pero con un estanque flexible, fluctúa en \$ 9.000.000.

Consideraciones para el análisis

Tabla 20: con precios de mercado de distribuidores de Estanques flexibles para acumulación de agua para distintos volúmenes, valores netos:

Item	Valor Neto
Estanque Flexible 100 m ³	\$ 5.000.000
Estanque Flexible 50 m ³	\$ 2.250.000
Estanque Flexible Francés 40 m ³	\$ 1.980.000

Tabla 21: presupuesto detallado de Scalls con acumulación en estanque flexible y área de captación en techo para un volumen de 100 m³.

PARTIDAS	UNID	CANTIDAD	V. UNIT	TOTAL
ESTANQUE FLEXIBLE FRANCÉS PARA 100 M³				5.106.038
Estanque Flexible Francés para 100 m ³ .	c/u	1	\$ 4.998.538	\$ 4.998.538
Preparación de cama	c/u	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Excavación	m ³	25	\$ 2.300	\$ 57.500
CONDUCCIÓN Y AREA DE CAPTACIÓN TECHO				\$ 406.683
Canaletas aguas lluvias 125 mm (Tapa canal, Unión, Soporte,	ml	50	\$ 4.327	\$ 216.350
Tapacan Cepillado 1"x5"	ml	30	\$ 1.283	\$ 38.490
Bajada de aguas lluvias Pvc	c/u	1	\$ 6.476	\$ 6.476
Conducción Aguas lluvias al acumulador PVC San Gris 110 mm	ml	20	\$ 4.491	\$ 89.820
Sistema primer lavado	c/u	1	\$ 55.547	\$ 55.547
RED DE RIEGO				\$ 55.159
Tubería HDPE 50 mm	ml	12	\$ 2.640	\$ 31.680
Terminal HE Compresión HDPE	c/u	1	\$ 3.142	\$ 3.142

Continuación Tabla 21

Válvula de compuerta	c/u	1	\$ 15.984	\$ 15.984	
Codo Pvc 50 mm x90°	c/u	2	\$ 614	\$ 1.228	
Terminal Espiga 1 1/2". Polietileno	c/u	1	\$ 3.125	\$ 3.125	
OBRAS COMPLEMENTARIAS				\$ 315.000	
Transporte Retroexcavadora	N°	1	\$ 0	\$ 0	
Fletes materiales	N°	1	\$ 50.000	\$ 50.000	
Letrero de Obras	GL	1	\$ 200.000	\$ 200.000	
Replanteo Topográfico	GL	1	\$ 65.000	\$ 65.000	
CONSTRUCCION DE CERCO PERIMETRAL					
Cierre Perimetral c/ Polín impregnado 3" a 4", malla 5014	ml	50	\$ 6.000	\$ 300.000	
				Neto	\$ 6.182.880
				Utilid 10%	\$ 618.288
				G.G 5%	\$ 309.144
				Formulación	\$ 494.630
				Sub-Total	\$ 7.110.312
				Iva	\$ 1.350.959
TOTAL			Total	\$ 8.955.902	

11.1.6. Conclusiones

Los sistemas de Captación y Acumulación de Aguas Lluvia son una alternativa real para la pequeña agricultura en zonas de escasez hídrica y permiten asegurar agua en los periodos de mayor demanda para los cultivos.

El trabajo de investigación y validación de tecnologías que realizan las universidades son relevantes para lograr un desarrollo sostenido de la agricultura chilena, pero también es importante que los profesionales del agro, sean capaces de tomar y adecuar estas nuevas tecnologías a la realidad existente en cada territorio."Copiar, pero innovar".

El trabajo con los sistemas de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias debe encaminarse a aumentar la capacidad de acumulación de agua y por lo tanto, buscar las mejores alternativas para captar la mayor cantidad de agua lluvia al menor costo posible.

El Instituto de Desarrollo Agropecuario proyecta para el 2018, instalar en la pequeña agricultura de la Región del Maule, 80 Sistemas de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias, lo que permitirá apoyar el desarrollo productivo de las familias rurales más vulnerables del secano interior, costero y de la precordillera.

11.2. Sistemas de captación de aguas lluvias como innovación en los programas de gobierno

Reinaldo Ruiz Valdés
Carolina Morales Calderón

Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos

En los últimos años, en gran parte del territorio de Chile se ha observado un importante déficit hídrico asociado, entre otras razones, a una prolongada sequía que ya se extiende por varios años y que el Centro de Ciencias del Clima y Resiliencia (CR2), ha descrito como la Megasequía. Sin embargo, el principal desafío en relación a los recursos hídricos no está asociado estrictamente a la escasez absoluta del recurso, si no a la disponibilidad asimétrica de estos a lo largo del territorio.

Chile cuenta en promedio con una disponibilidad total de 53.000 m³ por habitante por año, cifra que supera significativamente la disponibilidad mundial que alcanza a los 6.600 m³. En efecto, desde el centro a la zona norte del país, las precipitaciones efectivas en promedio son menores a 100 mm al año y desde la zona centro hacia el sur, estas son superiores a los 1.000 mm al año. Adicionalmente, existen otros fenómenos que deben ser considerados al momento de analizar la disponibilidad del agua, como por ejemplo la variabilidad natural del clima y estacionalidad del ciclo hidrológico, los efectos del cambio climático, la calidad de las aguas, la asignación y concentración de los derechos de aprovechamientos de estas.

El actual estado y disponibilidad de los recursos hídricos han generado una real preocupación y atención del manejo y gestión de los recursos hídricos. El aumento de la población, el crecimiento económico y el mayor desarrollo social, necesariamente conduce a una mayor demanda por agua. Esto obliga a que entre los nuevos desafíos se considere la ejecución de grandes inversiones en infraestructura que permitan aumentar la capacidad de embalsamiento, así como también se requiere mejorar los sistemas de conducción, incentivar el uso sustentable del recursos agua, implementar nuevas tecnologías de riego, y desarrollar nuevos cultivos con especies de mayor tolerancia a condiciones climáticas con menos disponibilidad de recursos hídricos.

Son muchos los desafíos que existen en torno a la gestión de los recursos hídricos y Chile no es ajeno a esto. El Gobierno de la Presidenta Bachelet ha señalado, desde sus inicios, la importancia de resolver con una visión de largo plazo las dificultades que hoy se observan en términos de disponibilidad de agua. Asegurar su disponibilidad, tanto en términos de cantidad y de calidad, se ha transformado en uno de los pilares para el desarrollo de la agenda productiva. Es por ello que la Presidenta decidió designar, casi al iniciar su mandato, un Delegado Presidencial para los Recursos Hídricos y ha solicitado al Consejo de Innovación para el Desarrollo (CNID) elaborar una agenda pública del agua que contemple iniciativas en el ámbito de la investigación, innovación y desarrollo de los recursos hídricos.

11.2.1. El agua como derecho humano

Durante el año 2010, la Asamblea General de las Naciones Unidas a través de la Resolución 64/292 reconoció explícitamente el acceso al agua potable y al saneamiento como un derecho humano. Esta resolución exhorta a los Estados y organizaciones internacionales a proporcionar recursos financieros, a propiciar la capacitación y la transferencia de tecnología para ayudar a los países, en particular a los países en vías de desarrollo, a proporcionar un suministro de agua potable y saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos.

A pesar del reconocimiento de este derecho, en muchos casos este se encuentra amenazado por la falta de resguardo estatal frente a los grandes consumidores que en su mayoría pertenecen al ámbito productivo. En el caso de Chile, el rol protector de este derecho es aún más complejo. En su mayoría, los derechos de aprovechamiento de agua ya han sido asignados y el recurso mismo es administrado como si se tratara de un bien privado.

Si bien en el actual Código de Agua define a este recurso como un “bien nacional de uso público”, al mismo tiempo los derechos de aprovechamiento que otorga el estado están protegidos como un bien económico, en la medida que la propia Constitución Política de la República les reconoce a los titulares de estos derechos la propiedad sobre los mismos. En concordancia con esta protección constitucional, desde 1981 y por medio del Código de Aguas vigente, los derechos de aprovechamiento de agua se han concedido a particulares de forma gratuita y perpetua, los cuales posteriormente pueden ser transferidos o vendidos.

Esta forma de asignación de los derechos de aprovechamiento de las aguas y la propiedad de un bien económico, ha permitido acaparar y concentrar los derechos de uso en un número reducido de particulares, lo que ha significado en algunos casos, limitar el acceso al agua de un número significativo de personas.

11.2.3. Desafíos de Chile en la gestión de los recursos hídricos

La UNESCO en el 2015, a través del Informe de Agua señala que si se mantienen los niveles de crecimiento económico, para el año 2030, la demanda mundial por agua superará en un 40% la disponibilidad actual de las aguas

subterráneas. Adicionalmente, si a esta situación se agregan los efectos del cambio climático, las proyecciones son aún más preocupantes, poniendo en riesgo la salud y vida de un número significativo de personas y el desarrollo sustentable de las naciones.

Por su parte, la OCDE proyecta que a mediados de este siglo la demanda de agua se incrementará en 55%, y en consecuencia, la brecha de acceso al agua para garantizar el desarrollo económico global podría alcanzar al 40%.

Particularmente, en el caso de Chile, el crecimiento económico y el mayor nivel de desarrollo alcanzado por la población en los últimos 30 años, son algunos de los elementos que explican el aumento de la demanda por agua en nuestro país. El Producto Interno Bruto nacional que se registró en 1990 corresponde a un 30% del nivel observado para el año 2014, es decir, el tamaño actual de la economía chilena es más de tres veces de lo que era hace 25 años. Si consideramos que más del 60% del PIB depende del agua, se puede considerar que este recurso es esencial no tan solo para la subsistencia humana sino también para el desarrollo actual y futuro de las actividades productivas.

11.2.4. Política pública para los recursos hídricos

La creciente demanda por agua y el aumento de actores que la utilizan ha llevado a casi todos los países del planeta a adecuar sus legislaciones, reordenar sus instituciones, mejorar y tecnificar los sistemas de riego, implementar nuevas tecnologías de captura y reutilización de aguas, sistemas de captación de aguas lluvias, recarga de acuíferos y desalación de agua.

Con estos elementos se hace evidente la necesidad de realizar cambios sustantivos en la gestión de los recursos hídricos a nivel país. Es preciso contar con una Política que se base en conocimientos, cuantificación, buena administración y uso eficiente. Esta Política debe incluir la participación de todos los usuarios del agua, reconociendo sus derechos y obligaciones para un uso sustentable de los recursos hídricos.

La Presidenta Bachelet definió las principales tareas que debían ser abordadas en esta materia. En primer lugar, realizar un diagnóstico de la situación actual de los recursos hídricos; segundo, identificar iniciativas de inversión de corto, mediano y largo plazo; tercero, coordinar acciones interinstitucionales orientadas a mejorar la gestión del agua; y cuarto, proponer modificaciones al ordenamiento legal e institucional. A partir de este mandato presidencial, se elabora el documento Política Nacional para los Recursos Hídricos 2015 que, además de entregar algunos elementos de diagnóstico, identifica las principales líneas de acción sobre las cuales se pueden desarrollar las políticas públicas así como el rol de los distintos actores del mundo público y privado, incluyendo las tareas que pueden abordarse desde el ámbito académico. Junto con lo anterior, se propone un plan inversiones que se concentran en aumentar la disponibilidad de agua para el consumo humano y para el desarrollo de las actividades productivas del país. En el mencionado documento se hace presente que los procesos de formulación e implementación de políticas públicas relacionadas con la gestión de los recursos hídricos deben estar basadas en información obtenida a partir de investigaciones y sustentada en conocimiento científico, confiable, actualizada y lo más precisa posible sobre el estado y usos de todos los recursos hídricos. Junto con lo anterior, se señala la importancia de contar además, con un marco regulatorio adecuado y que los criterios de asignación de los derechos de aprovechamiento deben incorporar las nuevas realidades que impone el cambio climático así como las especificidades de cada cuenca.

11.2.5. Sistemas de Captación de Aguas Lluvias como Programa de Gobierno

Luego de revisar diversas experiencias internacionales en relación a nuevas tecnologías que permitan enfrentar los efectos del cambio climático y las recurrentes sequías, los sistemas de captación de aguas lluvias se han convertido en una solución y alternativa a implementar para la disponibilidad del recurso agua en tiempos de crisis y escasez hídrica, particularmente en sectores que hoy día están siendo abastecidos por camiones aljibes.

Estos sistemas son una alternativa que involucra bajos costos, puesto que se construyen utilizando los techos de viviendas, galpones, invernaderos, etc, como áreas de captación, acompañados con un sistema de conducción (canaletas que en su efecto pueden ser las mismas ya instaladas en las techumbres o mejoradas) y un estanque de acumulación para las aguas capturadas.

Si bien en Chile esta técnica de capturar agua no es tan desconocida, hasta ahora no ha sido una alternativa replicable a gran escala como fue el caso de Brasil con el programa de 1 millón de cisternas impulsado por el gobierno de ese país. La Presidenta Bachelet, en el contexto del Plan para asegurar el agua para Chile anunciado en marzo de 2015, comprometió la implementación de al menos 6.400 sistemas de captación de aguas lluvias para las regiones del BíoBío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.

Este programa de sistemas de captación de aguas lluvias contribuye a enfrentar de mejor forma la situación de muchas familias que hoy en día son atendidas a través de camiones aljibes. Estos sistemas son una buena alternativa para almacenar y disponer de agua para el uso doméstico, y permitirán reducir directamente el gasto destinados al abastecimiento a través de camiones.

Una consecuencia directa de la sequía que ha afectado a Chile desde hace varios años, ha sido el crecimiento explosivo que ha experimentado la utilización de camiones aljibes para proveer de agua a una población estimada de 400 mil personas. En efecto si en el año 2010 se destinaron poco más de mil millones de pesos para financiar este programa, el año 2015 esta cifra alcanzó a 47 mil millones. Sin embargo, se ha observado que la provisión de agua mediante camiones aljibes no necesariamente puede atribuirse exclusivamente a una situación de escasez permanente de agua. A pesar de que las precipitaciones aumentaron en los últimos dos años, esta mayor disponibilidad de agua no se ha traducido en una disminución en la demanda de abastecimiento mediante camiones aljibes. En algunos casos el problema principal de desabastecimiento se ha debido al deterioro de los sistemas de agua potable rural (APR) y también al aumento de la población beneficiada respecto del número original de personas para el cual se diseñó el sistema de APR. Esta expansión en la población que utiliza un determinado sistema de APR puede haber generado un nivel de extracción que probablemente excedió la tasa de sustentabilidad de la fuente subterránea que abastece el APR. Esta disminución en los caudales se agudizó por efectos de la sequía y por la escasa o nula preocupación por implementar proyectos de acumulación de aguas lluvias durante el período invernal que permitieran aliviar la presión sobre la fuente subterránea, facilitando de esta forma la recarga de los acuíferos. En consecuencia, a lo largo de Chile, actualmente se destinan mensualmente cerca de US\$ 5 millones en la compra y distribución de agua a través de camiones aljibes, actividad que se financia con recursos de emergencia del Ministerio del Interior.

Desde el año 2014, la Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos ha difundido y apoyado a través de encuentros y seminarios internacionales, la implementación de estos sistemas para usos domésticos y su potencial para ser escalable a sistemas que pueden satisfacer necesidades de pequeñas familias productoras.

Los proyectos que se han estado implementando son de los siguientes tipos:

- ✓ Proyectos desarrollados por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), que comenzaron entre los años 2009 y 2010 en la Región de O'Higgins con el objetivo de entregar a los pequeños agricultores nuevas herramientas que les permitieran combatir los efectos de la escasez de agua que desde ese entonces, se evidenciaban. Estos sistemas responden al "Modelo de cosecha de aguas lluvias" que ha definido el INIA y que consiste en la colecta de agua desde la techumbre de casas, bodegas, o cualquier construcción que posea un techo preferentemente de zinc. El agua es colectada a través de canaletas plásticas y conducidas a un estanque de 5.400 litros del mismo material, el cual debe estar previamente protegido del sol. Finalmente, el agua acumulada es utilizada en invernaderos de 40 m² (5 x 8) para producir hortalizas.
- ✓ Proyectos del Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), destinados a la provisión de equipamiento básico para los usuarios de INDAP, esto es, pequeños productores dedicados a la agricultura familiar campesina. Normalmente consisten en un estanque de acumulación de aguas lluvias que utiliza como área de captación el techo de las propias viviendas, que permite satisfacer las necesidades para el consumo doméstico pero que, dependiendo del área de captación y de la capacidad de embalsamiento, el agua acumulada también puede ser utilizada para riego de pequeños huertos familiares y para el consumo de agua para animales. Además del componente productivo los proyectos INDAP también se asocian con resolver situaciones de emergencia provocadas por la escasez hídrica que pueden a su vez ser consecuencia de la sequía.

- ✓ Proyectos que actualmente está desarrollando la Comisión Nacional de Riego (CNR), producto de la reorientación de algunos de sus instrumentos, los cuáles están esencialmente centrados en la modalidad de proyectos concursables para riego. En este sentido, se han focalizado algunos recursos para apoyar el desarrollo de emprendimientos productivos de la pequeña agricultura financiando la instalación de estos sistemas.

La principal diferencia con los proyectos de INDAP radica en que los sistemas de captación de aguas lluvias financiados por la CNR tienen que tener, obligatoriamente, un componente de desarrollo productivo a una escala mayor de los que financia INDAP. Por esta razón, los sistemas tipo CNR representan, generalmente, un mayor volumen de recursos.

Hay que destacar el esfuerzo que han mantenido estas instituciones en la implementación de estos sistemas que permiten enfrentar de mejor forma la escasez de recurso agua y el trabajo que están realizando de forma conjunta a través de una alianza estratégica (INDAP, CNR e INIA) que ha permitido implementar nuevos módulos en diferentes comunas del país.

Por su parte, la Universidad de Talca a través de Fondos de Innovación para la Competitividad (FIC) de la Región del Maule, ha permitido desde el año 2011 implementar un importante número de sistemas de captación de aguas lluvias en esta región, con el objetivo de investigar y estudiar los diferentes materiales y consideraciones técnicas que permitirían ser más eficiente este tipo de sistemas en relación a los costos y beneficios como la calidad de las aguas.

Finalmente, están los 6.400 proyectos comprometidos por la Presidenta Bachelet en el marco del Plan Nacional para asegurar el agua para Chile, anunciado en marzo del año 2015, en que por primera vez se incorpora el sistema de captación de agua como un componente de un programa de gobierno de carácter relativamente masivo, cuyo objetivo principal es contribuir a resolver situaciones de emergencia mediante la instalación de una infraestructura de acumulación relativamente simple, de bajo costo y que pueda ser fácilmente replicable por otras personas. Como se señaló anteriormente, estos 6.400 sistemas se instalarán en las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, se priorizarán aquellas localidades donde se pueda sustituir la actual provisión de agua mediante camiones aljibes por sistemas de acumulación y que incluso puedan considerar expandir la capacidad de acumulación, aumentando de esta forma el tiempo de autonomía respecto de los camiones aljibes, los cuáles deberían ser utilizados sólo en situaciones de extrema emergencia. Este programa está en su etapa de implementación considerando que, en algunas de las regiones, ya se ha iniciado con la compra de los estanques.

12 – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Derivado del desarrollo del presente proyecto, se han podido establecer variados criterios para la construcción de sistemas de captación de aguas lluvias a nivel territorial. Un primer elemento es que se deben reconocer las singularidades geográficas, especialmente en un país como Chile, debido a la gran diferencia que existe en los montos de precipitación en el sentido latitudinal y también longitudinal, ya que de esto dependerán las dimensiones de la obra que se desea construir.

Un segundo aspecto importante de destacar, es que se hace necesario establecer los mínimos diseños de ingeniería que aseguren un abastecimiento de agua. Para ello es esencial realizar un análisis de la precipitación que cae en el lugar y con una probabilidad de diseño de lluvia del 10%, se asegura que la obra disponga de agua en 9 de cada 10 años, como un objetivo mínimo a alcanzar. Esto podría definirse para 99 de cada 100 años, pero encarece excesivamente los costos.

Otro aspecto que es menester definir con claridad, es qué uso se le dará al agua, en virtud de lo cual se deberán establecer los estándares mínimos en la calidad del recurso hídrico a recolectar y mantener. No es lo mismo recolectar agua para el control y minimización del impacto de incendios forestales, que para un uso doméstico, y ello habla de exigencias diversas.

Otro aspecto a considerar, es que si se quiere construir este tipo de obras para reemplazar a los camiones aljibes, que son los encargados de abastecer de agua a la población rural en la época estival, se tienen que incorporar métodos de ingeniería de transportes. Ello porque, como primera aproximación, debería definirse que la construcción de Scalls abarque primariamente las zonas más alejadas, para reducir drásticamente el recorrido de los camiones aljibes. Un proceso de optimización es entonces deseable de ser implementado para estos fines.

La ejecución de este proyecto y el desarrollo tecnológico de los SCALLs, despertó el interés de diversos organismos gubernamentales y no gubernamentales, por implementarlos para diversos fines. . Un ejemplo de ello fue que a partir del 2014, Indap y la recién creada Delegación presidencial para los Recursos Hídricos, fomentaron la construcción de estas obras en diversas partes de la Región del Maule y de otras regiones del país, ya que con ellas se pueden acumular desde decenas de metros cúbicos a miles de ellos, y esa agua es “gratis”.

Un elemento altamente relevante que surgió de este proyecto, es que desde el punto de vista económico, un sistema de captación de aguas lluvias se evalúa como una alternativa al uso de los camiones aljibes. Así, se estima que en promedio cada SCALLs genera un VAN social esperado de \$13.700.000, dado el diseño hidrológico propuesto para el sistema, fluctuando entre un mínimo de \$12 millones y un máximo de \$17 millones. Las diferencias observadas entre las distintas comunas analizadas se explican principalmente por el costo de transportar un metro cúbico de agua a través de camiones aljibes, mecanismo mediante el cual se soluciona actualmente el problema de agua en estas comunas. El periodo de recuperación del capital se estima en 2,7 años. Así, se concluye que la implementación de un sistema de agua lluvia para zonas rurales de la región del Maule es una inversión segura, con VAN positivo y con un 99% de confianza, lo que la vuelve una alternativa económicamente viable.

Finalmente, se recomienda globalmente y dados los resultados de este proyecto, que la implementación de estos sistemas de captación de aguas lluvias se realice teniendo presente los aspectos logísticos del traslado de materiales y las necesidades de la población. Para ello han surgido diversas opciones tecnológicas que quedan a disposición de toda la comunidad, lo que da muestras de que la investigación científica y tecnológica, puede ser una herramienta eficiente en la búsqueda de respuestas a las necesidades más sentidas de la población, como lo es contar con agua de calidad en tiempo, en espacio y en oportunidad.

13.- LECTURA CONSULTADA

- Alfaro, C. W. (2009). Adaptación a los impactos en desertificación y sequía por efecto del cambio climático en Chile, mediante sistemas de cosecha de aguas lluvias. Punto Focal Nacional. Convención UNCCD. Chile.
- Banco Mundial. 2011. Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Banco Mundial.
- Ballén, Galarza y Ortiz (2006). “Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia”. VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. João Pessoa (Brasil), 5 a 7 de junio de 2006
- Bartens J, Day S, Harris J, Dove J, Wynn T. 2008. Can urban tree roots improve infiltration through compacted subsoils for stormwater management? J. Environ. Qual. 37: 2048-2057.
- Beerling, D.J. and F.I. Woodward. 2001. Vegetation and the terrestrial carbon cycle: modeling the first 400 million years. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 405 p.
- Cabrera E. (2006). “La Tarificación, herramienta esencial en la gestión sostenible del agua”. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Centro del Agua Para la Agricultura, Universidad de Concepción. 2012. Boletín Técnico N°1 . Necesidades de agua de los Cultivos.

- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente de Perú. 2003. Captación de Agua Lluvia para consumo humano.
- Chow, V.; Maidment, D.; Mays, L. 1994. Manual de hidrología aplicada. Santafé de Bogotá, Colombia: Mc Graw-Hill. 584 p.
- CNR-CIREN. 1997. Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile. Comisión Nacional de Riego y Centro de Información de Recursos Naturales (CORFO). Santiago, Chile. 54p.
- Cromell C, Miller J, Bradley LK. 2003. Earth-Friendly Desert Gardening. Phoenix, AZ: Arizona Master Gardener Press. 136 p.
- Dirección General de Aguas (DGA) 2014 - 2016. Disponible en <http://www.dga.gob.cl>.
- Dhillon, R.S. and G. von Wuehisch. 2013. Mitigation of global warming through renewable biomass. Biomass and Bioenergy 48: 75-89.
- Easterling, D. R. et al. 2000. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. Science 289(1): 2068-2074.
- Environmental Protection Agency, Office of Water (US) [EPA]. 2009. Technical Guidance on Implementing the Stormwater Runoff Requirements for Federal Projects under Section 438 of the Energy Independence and Security Act. Washington, DC. 61 p.
- Environmental Protection Agency, Office of Water (US) [EPA]. 1999. Storm Water Technology Fact Sheet: Bioretention. Washington, DC.
- Eugster G. 2000. Seven Principles of Green Infrastructure. In: Proceedings of the 2000 American Planning Association National Planning Conference. 2000 Apr 15-19; New York, NY. 2000. 6p.
- Foro Mundial del Agua. 2006. Documento Temático, eje temático 3. Agua y saneamiento para todos, ciudad de México, 141pp.
- García-Chevesich, P. 2015. *Rainwater harvesting practices in the United States*. In: Pizarro, R., A. Abarza, C. Morales, R. Calderón, J. Tapia, P. García, and M. Córdova. Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvia en zonas rurales de Chile. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. International Hydrological Program. Documento Técnico N° 36. 94 p.
- García-Chevesich, P. 2015. Erosion control and land restoration. Outskirts Press. Denver, CO. 451 p.
- García-Chevesich, P., D. Neary, D. Scott, and R. Benyon (Eds.). 2015. *Forest management and the impact on water resources: a review of 12 nations*. United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization. International Hydrological Program. 204 p.
- García-Chevesich, P., R. Pizarro, and R. Valdes. 2014. How forestry in the southern hemisphere can help address desertification and global climate change. Journal of Forestry. In press.
- García-Chevesich, P. 2015. Control de la erosión y recuperación de suelos degradados. Outskirts Press. Denver, CO. 407 p.
- García-Chevesich, P. y J. J. Aguirre. 2013. Manual de diseño de sistemas de cosecha de aguas lluvia, para uso domiciliario. Instituto Forestal. Gobierno de Chile. 19 p.

- García-Chevesich, P., S. Alvarado, D. Neary, R. Valdes, J. Valdes, J. Aguirre, M. Mena, R. Pizarro, P. Jofré, M. Vera, and C. Olivares. 2014. Respiratory disease and particulate air pollution in Santiago Chile: Contribution of erosion particles from fine sediments. *Journal of Environmental Pollution*. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.12.028.
- Gaston, T. L. 2010. Rainwater harvesting in the southwestern United States. 26 p.
- Gleason, A. (2005). Manual de aprovechamiento de aguas pluviales en centros urbanos. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Arte, Arquitectura y Diseño. México.
- Guerrero, Tanni y et.al. (2009). "El agua en la Ciudad de México". *Ciencias* 94, abril-junio, 16-23.
- Hasse, R. 1989. Rainwater Reservoirs Above Ground Structures for Roof Catchment. Antwerp: Humanity
- Haynes Jr., C. V. et al. 1999. A Clovis well at the type site 11,500 BC: The oldest prehistoric well in America. *Geoarchaeology* 14: 455-470.
- Hu, F. S. et al. 1999. Abrupt changes in North American climate during early Holocene times. *Nature* 400 (1): 437-440.
- INN-Chile, 1999 a. Calidad del agua - Muestreo - Parte 2: Guía sobre técnicas de muestreo. Norma Chilena Oficial NCh 411/2.Of96, Instituto Nacional de Normalización, Chile. 16 pp.
- INN-Chile, 1999 b. Calidad del agua - Muestreo - Parte 3: Guía sobre preservación y manejo de las muestras. Norma Chilena Oficial NCh 411/3.Of96, Instituto Nacional de Normalización, Chile. 40 pp
- INN-Chile, 1999 c. Calidad del agua - Muestreo - Parte 10: Guía para el muestreo de Aguas residuales. NCh 411/10 Of 97
- INN-Chile, 1999 d. Calidad del agua - Muestreo - Parte 6: Guía para el muestreo de ríos y cursos de agua. Norma Chilena Oficial NCh 411/6.Of96, Instituto Nacional de Normalización, Chile. 14 pp.
- INN-Chile, 1984. Norma Chilena de Agua Potable. Norma Chilena Oficial NCh 409/2.Of70, Instituto Nacional de Normalización, Chile. Decreto N° 354.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2007. Ingeniería hidráulica en México: Ciencia y tecnología del agua.
- IRCSA. 2005. XII Conference International Rainwater Catchments Systems Association Nueva Delhi. www.ircsa.org y www.irha-h2o.org
- Jackson, R. B. et al. 2011. Water in a changing world. *Ecol. Appl.* 11: 1027-1045.
- Jones, M. P., & Hunt, W. F. (2010). Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(10), 623-629. 10.1016/j.resconrec.2009.11.002.
- Lancaster, B. 2013. Rainwater harvesting for drylands and beyond Vol. 1, 2nd edition. Tucson, AZ. Rainsource Press. 282 p.
- Lancaster B. 2008. Rainwater harvesting for drylands and beyond Vol. 2. Tucson, AZ. Rainsource Press. 404 p.
- Laureano, Pietro. 2002. "Traditional Techniques of Water Management to Fight Against Desertification".
- MacAdam, J. 2010. Green Infrastructure for Southwestern Neighborhoods. Watershed Management Group. 47 p.

- Meltzer, D. J. 1999. Human responses to Middle Holocene (Altithermal) climates on the North American Great Plains. *Quat. Res.* 52: 404-416.
- Ministerio de Desarrollo Social. 2014. Informe de Desarrollo Social 2014.
- Mujumdar, A.S., and R.D. Piacentini. 2013. Guest Editorial: Urgent need for reduction in greenhouse gas emissions in industrial processes: are we past the tipping point for global warming? *Dry. Technol.* 31(1): 3-4.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2004. Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud. Hechos y cifras (en línea). Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/publications/2004/factsfigures_2004_spa.pdf
- Pacheco, M. 2008. Avances en la Gestión Integral del Agua Lluvia (GIALL): Contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de "Lluviat" en México. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, pp. 39-57.
- Pandey, D. N., A. K. Gupta, and David M. Anderson. 2003. Rainwater harvesting as an adaptation to climate change. *Current Science* 85(1): 46-59.
- Phillips AE. 2005. (Ed.). *City of Tucson Water Harvesting Guidance Manual*. Tucson, AZ. City of Tucson. 35p.
- Piacentini, R.D. and A.S. Mujumdar. 2009. Climate change and the drying of agricultural products. *Dry. Technol.* 27: 629-635.
- Pizarro, R; Morales, C; Balocchi, F; Sangüesa, C; Vargas, J. 2012. Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile, Capítulo Aguas Continentales.
- Pizarro, R; Novoa, P. 1986. Elementos técnicos de hidrología. Corporación Nacional Forestal (CONAF). La Serena. Chile. 78p.
- Pizarro R., Sangüesa, C.; Flores, J.; Martínez, E. 2004. Diseño de Obras para la Conservación de Aguas y Suelos. CORFO 2004.
- Postel, S. L., Daily, G. C. and Ehrlich, P. R. 1996. Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 271: 785-788.
- Rohde, R.A. and R.A. Muller. 2005. Cycles in fossil diversity. *Nature* 434: 208-210.
- Ruskin R. (2001). "Recolección de agua con cisternas 2ª parte: dependencias de goteo". *Agua latino América*. Septiembre / octubre, 2001.
- Singh, U. 2013. Carbon capture and storage: an effective way to mitigate global warming. *Curr. Sci.* 105(7): 914-922.
- Smith, S. V., Renwick, W. H., Bartley, J. D. and Buddemeier, R. W. 2002. Distribution and significance of small, artificial water bodies across the United States landscape. *Sci. Total Environ.* 299: 21-36.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Avery, M. Tignor, and H.L. Miller. (Ed.). 2007. *Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. 996 p.
- Solomon S., G.K. Plattner, R. Knutti, and P. Friedlingstein. 2009. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A* 106(6): 1704-1709.

Stahle, D. W., Cleaveland, M. K., Blanton, D. B., Therrell, M. D., Gay, D. A. 1998. The lost colony and Jamestown droughts. *Science* 280: 564-567.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, AWWA and WPLF. Ed. 18 (1992)a. p. 2-56, (1992)b p. 4-100, (1992)c p. 4-85. Perkin Elmer. 1990. Analytical Methods for Atomic Absorption Spectrophotometry.

UNESCO, 2015. Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile. PHI – VIII. Documento Técnico n° 36.

UNESCO. 2012. WWDR4. Managing Water Report under Uncertainty and Risk.

Valdés, R; Pizarro, R; García, P; Valdés, J; Olivares, C; Vera, M; Balocchi, F; Pérez, F; Vallejos, C; Fuentes, R; Abarza, A; Helwig, B. 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change, *Journal of Hydrology*, Volume 519, Part C, 27 November 2014, Pages 2538-2567, ISSN 0022-1694, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>.

ANEXOS

Tabla A1. Valores de la Función P(p) auxiliar de Goodrich.

p	P(p)	p	P(p)	p	P(p)	p	P(p)
0,01	-1,081073	0,41	0,386468	0,81	1,456904	1,21	2,674452
0,02	-1,024852	0,42	0,414146	0,82	1,484261	1,22	2,709088
0,03	-0,970701	0,43	0,441677	0,83	1,511921	,23	2,744007
0,04	-0,918454	0,44	0,469072	0,84	1,539586	1,24	2,779192
0,05	-0,867965	0,45	0,496340	0,85	1,567363	1,25	2,814648
0,06	-0,819099	0,46	0,523491	0,86	1,595254	1,26	2,850379
0,07	-0,771738	0,47	0,550535	0,87	1,623263	1,27	2,88639
0,08	-0,725772	0,48	0,577480	0,88	1,651396	1,28	2,922686
0,09	-0,681101	0,49	0,604336	0,89	1,679655	1,29	2,959269
0,10	-0,637637	0,50	0,631110	0,90	1,708044	1,30	2,996145
0,11	-0,595295	0,51	0,657811	0,91	1,736569	1,31	3,033319
0,12	-0,554002	0,52	0,684447	0,92	1,765232	1,32	3,070794
0,13	-0,513687	0,53	0,711025	0,93	1,794037	1,33	3,108576
0,14	-0,474287	0,54	0,737553	0,94	1,822990	1,34	3,146668
0,15	-0,435743	0,55	0,764037	0,95	1,852092	1,35	3,185076
0,16	-0,398001	0,56	0,790485	0,96	1,881349	1,36	3,223804
0,17	-0,361012	0,57	0,816904	0,97	1,910765	1,37	3,262857
0,18	-0,324728	0,58	0,843299	0,98	1,940342	1,38	3,30224
0,19	-0,289107	0,59	0,869677	0,99	1,970086	1,39	3,341856
0,20	-0,254109	0,60	0,896450	1,00	2,000000	1,40	3,382012
0,21	-0,219696	0,61	0,922408	1,01	2,030087	1,41	3,422412
0,22	-0,185834	0,62	0,948772	1,02	2,060353	1,42	3,463161
0,23	-0,152490	0,63	0,975143	1,03	2,090800	1,43	3,504263
0,24	-0,119634	0,64	1,001527	1,04	2,121433	1,44	3,545725
0,25	-0,087236	0,65	1,027928	1,05	2,152255	1,45	3,58755
0,26	-0,055272	0,66	1,054354	1,06	2,183271	1,46	3,629743
0,27	-0,023715	0,67	1,080808	1,07	2,214484	1,47	3,672311
0,28	0,007458	0,68	1,107295	1,08	2,245899	1,48	3,715251
0,29	0,038270	0,69	1,133822	1,09	2,277519	1,49	3,75859
0,30	0,068742	0,70	1,160392	1,10	2,309348	1,50	3,80231
0,31	0,098893	0,71	1,187011	1,11	2,341390	1,51	3,846426
0,32	0,128742	0,72	1,213684	1,12	2,373650	1,52	3,890942
0,33	0,158307	0,73	1,240415	1,13	2,406131	1,53	3,935861
0,34	0,187606	0,74	1,267209	1,14	2,438838	1,54	3,981187
0,35	0,216653	0,75	1,294070	1,15	2,471773	1,55	4,026946
0,36	0,245464	0,76	1,321003	1,16	2,504942	1,56	4,073118
0,37	0,274054	0,77	1,348013	1,17	2,538349	1,57	4,119718
0,38	0,302437	0,78	1,375104	1,18	2,571997	1,58	4,166751
0,39	0,330625	0,79	1,402279	1,19	2,605891	1,59	4,214224
0,40	0,358631	0,80	1,429545	1,20	2,640035	1,60	4,262142w

Fuente: Pizarro et al. (1988)

Tabla A2. Valores de la Función Gama.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,0	1,000	0,994	0,989	0,984	0,978	0,974	0,969	0,964	0,960	0,955
1,1	0,951	0,947	0,944	0,940	0,936	0,933	0,930	0,927	0,924	0,921
1,2	0,918	0,916	0,913	0,911	0,909	0,906	0,904	0,903	0,901	0,899
1,3	0,897	0,896	0,895	0,893	0,892	0,891	0,890	0,889	0,889	0,888
1,4	0,887	0,887	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886	0,886
1,5	0,886	0,887	0,887	0,888	0,888	0,889	0,890	0,890	0,891	0,892
1,6	0,894	0,895	0,896	0,897	0,899	0,900	0,902	0,903	0,905	0,907
1,7	0,909	0,911	0,913	0,915	0,917	0,919	0,921	0,924	0,926	0,929
1,8	0,931	0,934	0,937	0,940	0,943	0,946	0,949	0,952	0,955	0,958
1,9	0,962	0,965	0,969	0,972	0,976	0,980	0,984	0,988	0,992	0,996

Fuente: Pizarro *et al.* (1988)