



Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura

Oficina Regional de Ciencia para  
América Latina y el Caribe



Programa  
Hidrológico  
Internacional

# Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile

# phi-LAC

Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO  
para América Latina y el Caribe

Autores:  
Roberto Pizarro  
Alejandro Abarza  
Carolina Morales  
Ronald Calderón  
Jaime Tápia  
Pablo García  
Miguel Córdova

PHI-VIII / Documento Técnico N° 36





Organización  
de las Naciones Unidas  
para la Educación,  
la Ciencia y la Cultura



Programa  
Hidrológico  
Internacional

Oficina Regional de Ciencia para  
América Latina y el Caribe



# Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile

**Autores:**

Roberto Pizarro  
Alejandro Abarza  
Carolina Morales  
Ronald Calderón  
Jaime Tapia  
Pablo García  
Miguel Córdova



Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO  
para América Latina y el Caribe

**Colaboradores:**

Fernando Urbina  
Carlos Vallejos  
María Inés Cortés  
Álvaro Fernández  
Claudia Sangüesa  
Juan Pino  
Sandra Vázquez  
Erick Cervantes  
Dante Hernández  
Rafael Hurtado

PHI-VIII / Documento Técnico N° 36



## PROLOGO

En los últimos 25 años se estima que la demanda por agua en Chile se ha duplicado. Esta tendencia se observa en muchos países del mundo por lo que asegurar la disponibilidad de agua se ha transformado en uno de los principales desafíos que enfrenta la humanidad. Proyecciones de la OCDE indican 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%.

Desde el punto de la disponibilidad de agua, Chile es sin duda, un país privilegiado. En efecto, el total de agua disponible por cada habitante alcanza a 53.000 m<sup>3</sup> por año, cifra que supera largamente los 6.600 m<sup>3</sup> de promedio mundial y los 2.300 m<sup>3</sup> per persona que organismos internacionales han señalado como el umbral mínimo para sostener la vida. Sin embargo, aún cuando en Chile tenemos mucha agua disponible, ésta se encuentra distribuida muy asimétricamente de norte a sur y de cordillera a mar.

La creciente demanda por agua y el aumento de actores que compiten por ella, ha llevado a muchos países del mundo a emprender importantes reformas en relación a sus recursos hídricos. Estas reformas incluyen, entre otras medidas, la readecuación de sus instituciones, cambios al ordenamiento jurídico y legal, mejoramiento y tecnificación de los sistemas de riego, el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías de captura y reutilización del agua y una creciente tendencia a obtener agua potable a partir de procesos de desalación.

Desde sus inicios, el actual Gobierno de la Presidenta Michelle Bachelet, ha asumido el compromiso de enfrentar las dificultades que se derivan de los severos desequilibrios hídricos, que se generan como resultado de la mayor demanda por agua y que se agudizan por efectos de la prolongada sequía que ha estado afectando a nuestro país. El Gobierno está decidido no sólo a resolver la emergencia, sino que fundamentalmente ha señalado que se necesitan medidas que permitan resolver de manera permanente los desequilibrios hídricos.

Hoy más que nunca el país requiere contar con una Política Nacional de Recursos Hídricos que permita enfrentar esta situación que dejó de ser sólo un problema coyuntural. En consecuencia, las propuestas para resolver estas dificultades deben contener medidas de corto, mediano y largo plazo, incluyendo cambios en la institucionalidad y en el ordenamiento jurídico vigente, de tal manera que incorpore todas aquellas variables que en el pasado reciente no fueron consideradas, como por ejemplo, los efectos del cambio climático que han transformado los eventos de sequía en una situación de carácter estructural.

Desde el Gobierno central y particularmente desde los Gobiernos Regionales se está trabajando en la elaboración de planes, programas, acciones y medidas para garantizar una adecuada gestión y disponibilidad de los recursos hídricos a nivel país. Entre las acciones y medidas se encuentra el promover y gestionar la implementación de los distintos Sistemas de Captación de Aguas Lluvias.

Como consecuencia de la escasez hídrica y la prolongada sequía, particularmente en zonas rurales, se ha agudizado la urgencia para asegurar el abastecimiento de agua potable. Esta situación actualmente se está resolviendo a través del reparto de agua por medio de un sistema de camiones aljibes, que ha involucrado un alto costo a nivel mensual además de otros riesgos asociados como la calidad del agua que se entrega.

De esta manera, los sistemas de captación de agua de lluvia se han transformado en una iniciativa real que permite ampliar la disponibilidad del recurso agua en épocas de crisis y escasez hídrica, especialmente en aquellos sectores que hoy día están siendo cubiertos por camiones aljibes.

Estas alternativas de acumulación de agua como concepto básico, constituyen una opción sencilla de captación y almacenamiento de agua lluvias, a través de áreas impermeabilizadas y un sistema de almacenamiento (cisternas o estanques) respectivamente. Sin embargo, estos sistemas de captación dependerán de la pluviometría de las zonas en las que se quiera implementar. Para lograr una eficiencia técnica y económica de estos sistemas, los sistemas de almacenamiento deben ser diseñados y calculados de acuerdo a las áreas de captación de aguas, es decir, deben ser diseñados en forma particular para cada zona en relación a los regímenes pluviométricos y al tipo de superficie impermeabilizada que capturarán los aportes de agua que van a ser almacenados posteriormente.

El presente Manual de Diseño de Obras de Captación de Aguas Lluvias, representa uno de los resultados concretos de la ejecución del presente proyecto financiado por el Fondo de Innovación para la Competitividad de la Región del Maule. Otro aspecto importante a rescatar de la ejecución de este proyecto, es establecer los mejores diseños y estándares de construcción asociadas a condiciones locales de la región.

En este contexto, surge la necesidad de reconocer el gran aporte que realiza hoy el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, con la elaboración y presentación de este Manual, el que se constituye en un primer elemento técnico que facilite la exitosa implementación de este tipo de sistemas a lo largo del país.

**Dr. Reinaldo Ruiz Valdés**

Delegado Presidencial de Recursos Hídricos

Publicado en el 2015 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

ISBN 978-92-9089-198-7 Documento Técnico N° 36: Manual de diseño y construcción de sistemas de capacitación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile.

© UNESCO 2015

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.

Se autoriza la reproducción, a condición de que la fuente se mencione en forma apropiada, y se envíe copia a la dirección abajo citada. Este documento debe citarse como.

UNESCO, 2015. Manual de diseño y construcción de sistemas de aguas lluvias en zonas rurales de Chile. Roberto Pizarro, Alejandro Abarza, Carolina Morales, Ronald Calderón, Jaime Tapia, Pablo Garcia, Miguel Córdova.  
Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 36

Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:

Programa Hidrológico Internacional para  
América Latina y el Caribe (PHI-LAC)  
Oficina Regional de Ciencia para América  
Latina y el Caribe  
UNESCO  
Dr. Luis P. Piera 1992, 2° piso  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: + 598 2413 2075  
Fax: + 598 2413 2094  
E-mail: [phi@unesco.org.uy](mailto:phi@unesco.org.uy)  
<http://www.unesco.org/phi>

Facultad de Ciencias Forestales  
Universidad de Talca  
Avenida Lircay S/N  
Talca, Chile  
Tel.: 56 71 220 0370 / 220 0375  
<http://www.cienciasforestales.cl>



<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>II. HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS (SCALLS)</b>	<b>5</b>
<b>III. PROPUESTA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS EN ZONAS RURALES DE CHILE</b>	<b>11</b>
3.1. Selección de Sitios.	11
3.2. Caracterización Hidrológica de los Sitios.	12
3.2.1. Selección de las estaciones.	12
3.2.2. Tratamientos estadísticos.	12
3.2.2.1. Definición de los estadígrafos de posición	12
3.2.2.2. Definición de las Funciones de Distribución de Probabilidad.	13
3.2.2.3. Ajuste a una Función de Distribución de Probabilidad.	14
3.2.2.4. Pruebas de bondad del ajuste.	17
3.2.3. Coeficiente de escorrentía.	19
3.3. Diseño Hidrológico de las Obras del Sistema de Captación y Acumulación de Aguas Lluvias.	20
3.3.1. Área de captación.	20
3.3.2. Sistema de conducción.	21
3.3.3. Cisterna de acumulación.	21
3.4. Definición, Selección y Combinación de Materiales.	22
3.5. Ejemplo	22
3.5.1. Cálculo de la FDP de Gumbel	22
3.5.2. Cálculo de la probabilidad de excedencia, precipitación de diseño y área de captación del SCALLs.	25
<b>IV. CONSTRUCCIÓN SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y ACUMULACIÓN DE AGUAS LLUVIAS, SCALLS.</b>	<b>27</b>
4.1. Replanteo en Terreno.	27
4.2. Etapas de Construcción.	27
4.2.1. Construcción área de captación.	28
4.2.2. Construcción del área de acumulación.	32
4.2.3. Sistema de conducción	38
4.2.4. Cierre perimetral	39
<b>V. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DEL SISTEMA</b>	<b>40</b>
5.1. Recomendaciones para el Estudio de Calidad de Aguas en Sistemas de Captación de Aguas Lluvias.	40
5.1.1. Muestreo de aguas y metodologías de análisis	40
5.1.2. Normativas vigentes para agua potable y de riego	44
5.1.3. Resultados	46

<b>VI. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES.</b>	<b>47</b>
6.1. Sistemas Urbanos de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs) en los Estados Unidos.	47
Pablo A. Garcia-Chevesich, Ph. D. University of Arizona, Department of Hydrology and Water Resources.	
6.1.1. Introducción.	47
6.1.2. Breve historia de los SCALLs.	48
6.1.3. SCALLs como adaptación frente al cambio climático en Estados Unidos.	48
6.1.4. Leyes de captura de agua de lluvia en los Estados Unidos.	49
6.1.5. Prácticas de captación de aguas pluviales en zonas urbanas de los Estados Unidos	51
6.1.5.1. Captación de agua de lluvia en techos	51
6.1.5.2. Sistemas de captación de agua de lluvia en áreas verdes comerciales y residenciales, estacionamientos y calles.	56
6.1.6. Agradecimientos.	61
6.2. Sistemas de Captación de Agua de Lluvia en Comunidades Rurales de México.	62
6.2.1. Resumen	62
6.2.2. Introducción.	63
6.2.3. Consideraciones para el diseño de SCALLs.	64
6.2.4. Construcción.	67
6.2.4.1. Área de captación	67
6.2.4.2. Almacenamiento	71
6.2.6. Conclusiones	84
6.2.7. Agradecimientos.	84
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>85</b>
<b>VIII. ANEXOS</b>	<b>91</b>

## I. INTRODUCCIÓN

El aumento sostenido de la población es un hecho inevitable, por esto 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 compuesta 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 al desarrollo social y económico de 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 viven 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 aguas lluvias y ello con el fin de satisfacer la demanda de los diversos consumos humanos.

En el marco descrito, se puede agregar que la Captación de Agua Pluvial (CAP) o Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs) es el término utilizado tradicionalmente para la recolección de agua de precipitación en países húmedos y áridos, en contextos de pobreza y riqueza. 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 que 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) (International 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. Esta opción además, permite disminuir las extracciones de agua de los acuíferos, lo que 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 también al ahorro de energía que otros sistemas utilizan. Asimismo, es importante en un territorio establecer relaciones efectivas con las instituciones de educación, las familias, las comunidades, las sociedades civiles locales y con el sector privado, con el objetivo de establecer un adecuado desarrollo de 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 tal como hoy en día, es decir, como una actividad aislada de los programas nacionales y locales. Debe convertirse en una estrategia que reafirma el camino hacia la sostenibilidad urbana y rural, y la satisfacción de necesidades vitales del conjunto de la población.

Pacheco (2008) señala que las ventajas del uso del agua lluvia no son solo físicas, sino culturales y económicas. Así, la captación *in situ* del agua pluvial deberá ser promovida oficialmente y ser incluida en normativas urbanas y rurales, 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.

De esta manera, los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs) pueden ser una herramienta que permita incrementar la disponibilidad hídrica en zonas urbanas y rurales en períodos estivales y de sequías, para así intentar satisfacer de mejor forma las demandas de agua potable, de agua para riego, para abastecimiento del consumo animal e incluso para el combate eficiente de incendios forestales.

Estos sistemas pueden ser construidos en áreas de terreno empinado, áreas remotas o de poca población. En tales áreas es menos factible, desde el punto de vista físico o financiero, instalar tuberías de distribución de agua, lo que obliga a realizar el abastecimiento de agua mediante camiones aljibes, y esto implica un alto costo para los entes públicos que gestionan dicha distribución, en este caso las municipalidades. Así, claramente los SCALLs se convierten en una alternativa apropiada para disminuir los costos de abastecimiento de agua, ya que si se piensa por ejemplo que en la Región del Maule, en Chile, el monto promedio anual de precipitación es de 1.000 mm y si además se supone un área de captación pequeña de sólo 50 m<sup>2</sup> y un aprovechamiento del 80% de las aguas lluvias, se podrían tener 40.000 litros (40 m<sup>3</sup>) de agua “gratuitos” cada año.

En Chile no existe una mayor experiencia acerca del uso de los SCALLs, aunque la prolongada sequía del periodo 2010-2014, ha hecho pensar a las autoridades y organismos técnicos que ésta podría ser una fuente importante de abastecimiento de agua, especialmente en zonas rurales. Así por ejemplo, solo en el transcurso del 2013, la Dirección General de Aguas (DGA) ha decretado zona de catástrofe en las comunas de Salamanca, Illapel, Canela, Andacollo y La Higuera, en la Región de Coquimbo; las que se suman a la Ligua, Petorca y Cabildo, en la Región de Valparaíso, que ya se encontraban en esa condición. Asimismo, entre las regiones de Atacama y del Maule, la DGA ha declarado zona de escasez en cinco provincias, seis comunas y tres cuencas. Al término del 2012 y según datos del Ministerio de Agricultura, 108 comunas de Chile (31% del total nacional) se hallaban en condición de emergencia agrícola producto del déficit hídrico, el doble de las registradas en 2011.

Por lo anterior, el Estado de Chile, entre los años 2012 y 2013, en promedio para cada año, invirtió más de 12 mil millones de pesos (cerca de US\$ 24 millones de dólares norteamericanos) solo en camiones aljibes para el combate del déficit hídrico. Para mediados de diciembre del año 2014, la inversión por este concepto, ha superado los 22 mil millones de pesos. Se espera por esto un importante aumento en los recursos destinados al reparto de agua a través de camiones aljibes, para los meses de enero y febrero 2015. Por lo mismo, la Subsecretaría del Interior coordinará el trabajo de seis servicios públicos para buscar soluciones definitivas que aseguren el recurso hídrico para consumo humano, entre las que se debe destacar, la revisión de los programas de Agua Potable Rural (APR), Sistemas de Acumulación de Aguas Lluvias (SCALLs) y programas de financiamiento regional, entre otros .

En las localidades rurales concentradas, los Comités de Agua Potable Rural (CAPR) se encargan de entregar el servicio de agua potable, a través de 1.500 CAPR y 130 cooperativas, que abastecen a 300 mil familias, aproximadamente 1,58 millones de habitantes rurales (Villarroel *et al.*, 2012). La cobertura de los CAPR en las zonas rurales es de 78%, en consideración de que existe una población rural total de 2.025.602 habitantes (INE, 2002). Por otra parte, en las localidades rurales semi-concentradas la realidad es radicalmente diferente. Actualmente se identifican 540 comunidades rurales semi-concentradas, con 195.000 habitantes, que se encuentran desprovistos de las redes de abastecimiento de agua y tienen un porcentaje de cobertura del 2% (DGA, 2012). Esto lo convierte en un factor de inequidad social relevante en la gestión del agua en Chile.

En función de lo expuesto, los sistemas de captación de aguas lluvias, SCALLs, se alzan como una alternativa importante en Chile, con el fin de disminuir los costos de abastecimiento de agua en zonas rurales y para aumentar la oferta de la misma, en un contexto que es propicio desde una perspectiva económica, legal y ambiental. Asimismo, normalmente se cuenta con proyectos para el desarrollo de recursos hídricos, los que son de tecnología muy sofisticada o muy cara, lo que puede hacerlos insostenibles. Frente a eso, se alzan los SCALLs como una alternativa viable y potencialmente factible de implementar a pequeña y gran escala. Esto porque los SCALLs representan una tecnología simple, de pequeña escala, de bajo costo y no perturbadora del medio ambiente, capaz de generar bienes públicos y privados, detener procesos de desertificación, usar aguas que no poseen dueño y, sobre todo, disminuir drásticamente los costos de abastecimiento en áreas rurales.

En el contexto anterior, el presente Manual se presenta como una guía derivada del conocimiento y experiencia adquirida en el desarrollo e implementación del proyecto “Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias en zonas rurales de la Región del Maule, con fines de abastecimiento doméstico y productivo en épocas de baja oferta hídrica”, código BIP N° 30.116.413 – 0, financiado por el Fondo de Innovación para la competitividad 2012, del Gobierno Regional del Maule. Esta es la segunda experiencia llevada a cabo en el país y la primera de más amplio alcance, la que ha sido desarrollada por el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, que se encuentra evaluando el funcionamiento de 12 unidades demostrativas en 5 comunas de la Región del Maule, Chile central.



## CAPÍTULO II

### II. HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS (SCALLS).

La captación y el almacenamiento del agua de lluvia no es una nueva tecnología. La construcción de pequeñas presas y medios de control de la escorrentía para fines agrícolas se remontan a tiempos remotos. Un ejemplo de ello son las terrazas de arroz en las Filipinas, que 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.

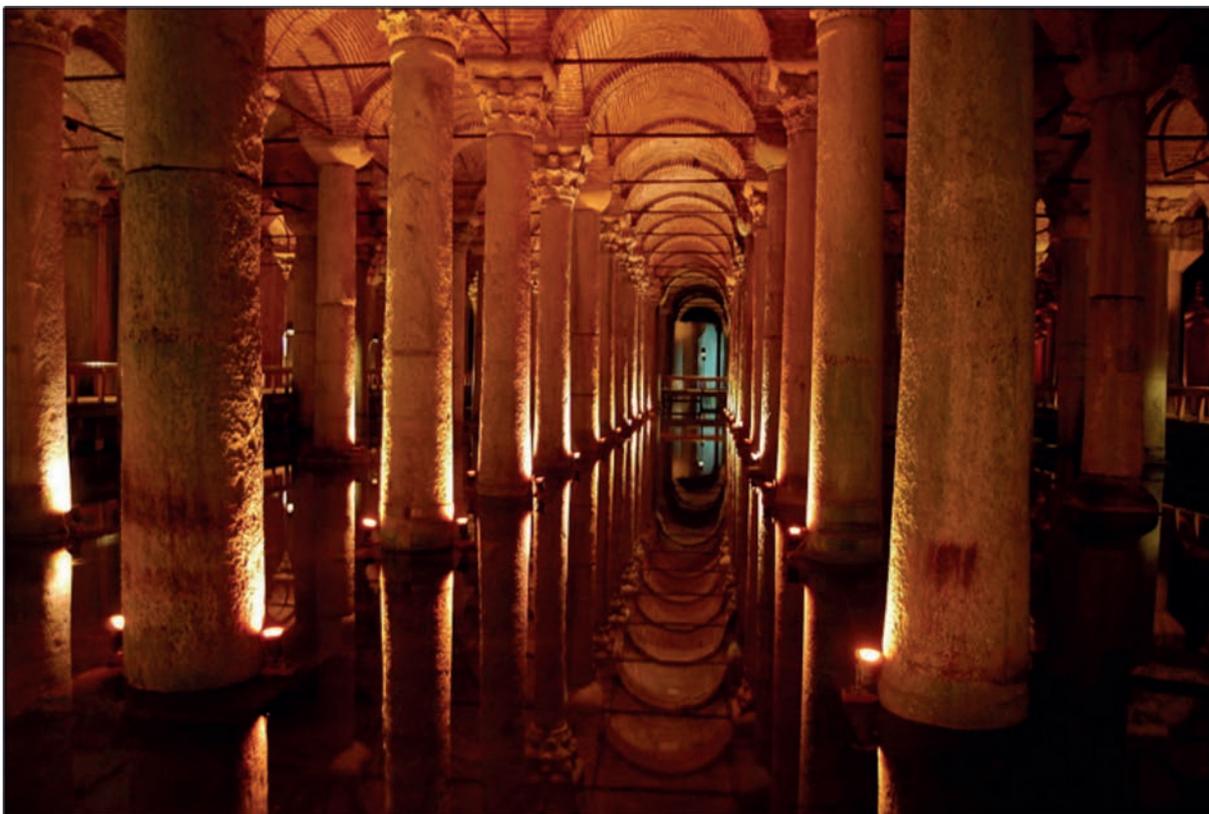
Por tanto, de lo anterior se desprende que las prácticas ancestrales de uso del agua lluvia han existido a lo largo de la historia de la humanidad. Se asocian al conocimiento local del medio natural, a la periodicidad y los volúmenes de precipitación, a la evaporación y las temperaturas locales. También 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 tiempos remotos el hombre 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. Ahí se domesticaron los cultivos y con ello, se encontró la primera aplicación al agua lluvia. Sin embargo, no se dependía 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 se han utilizado tradicionalmente a través de la historia de las civilizaciones, pero estas tecnologías solo se han comenzado a estudiar y publicar recientemente. En base a 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. Además, satisfacen las necesidades domésticas, con uso intensivo en las regiones áridas o semiáridas del planeta (Ballén *et al.*, 2006).

Probablemente la cisterna más grande es la Yerebatan Sarayi (Fig. 1), construida en la porción europea de Estambul (Turquía), bajo el mandato de César Justiniano (527-565 d.C.). Esta cisterna subterránea mide 140x70 metros y es capaz de almacenar 80 mil metros cúbicos de agua de lluvia. Otra cisterna en Estambul se llama Binbirdik y tiene una capacidad de 50.000 m<sup>3</sup>. Ambas cisternas sirvieron como depósitos de almacenamiento centralizado. El agua se recogía de los techos y las calles pavimentadas, y luego pasaba por un sofisticado sistema de filtros. Sin embargo, las cisternas subterráneas municipales en Estambul son probablemente los únicos ejemplos de captura de aguas pluviales urbanas centralizadas.

En el Desierto de Negev, ubicado en Israel y Jordania, se han encontrado evidencias significativas acerca de obras de aprovechamiento de aguas lluvias, lo que deja de manifiesto su utilización a través de la historia. Se han descubierto sistemas de captación de agua de lluvia que datan de 4.000 años o más, consistentes en el desmonte de lomeríos para aumentar la escorrentía superficial, entonces dirigida a predios agrícolas en las zonas más bajas. En la Fig. 2, 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., y que cuentan con patios y terrazas utilizadas para captar y almacenar agua lluvia.



**Figura 1.** El Yerebatan Sarayi en Turquía, es considerado la cisterna de almacenamiento de aguas lluvia más grande del planeta, con una capacidad de 80 mil metros cúbicos. Imagen cortesía de Ron Kaczor.

Arqueólogos han hallado sofisticados sistemas de captación y almacenamiento de agua de lluvia, SCALLs, en la isla de Creta, mientras se trabajaba en la reconstrucción del Palacio de Knossos (1700 a.C.). Esos sistemas influenciaron fuertemente el uso de SCALLs en el imperio romano. De hecho, los antiguos romanos se convirtieron en maestros en el uso de SCALLs y en la construcción de embalses. Fue su nueva técnica de construcción de cisternas cerradas, y al mismo tiempo la urbanización dentro del imperio romano, lo que resultó en el desarrollo de una cultura de captación de aguas pluviales en todos aquellos lugares donde los recursos hídricos eran limitados. Por esta razón, se han descubierto antiguas cisternas de acumulación de agua de lluvia en las islas de Capri y Malta, en lugares de interés histórico en España y Turquía, en el Líbano y en la isla de Sicilia.

Durante la República Romana (siglos III y IV a.C.), la ciudad de Roma en su mayoría estaba ocupada por viviendas unifamiliares denominadas “Domus”, que contaban con un espacio principal a cielo abierto (“atrio”). 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”.



**Figura 2.** Cisterna abierta para la recolección de agua lluvia. Yemen. Fuente: [www.agrega.educacion.es](http://www.agrega.educacion.es)

Muchos de los sistemas antiguos de vivienda romana, incluyendo las técnicas romanas de captación de agua de lluvia, tenían un doble propósito. La evaporación del agua acumulada en piscinas de jardín mejoraba el microclima a través de su efecto de aire acondicionado, al mismo tiempo que el agua se utilizaba para fines domésticos. Como resultado de la urbanización y un crecimiento de la población, el consumo de agua también se incrementó. Esto condujo al desarrollo de cisternas subterráneas cubiertas, que se construyeron debajo de las casas, con dos grandes ventajas: en primer lugar, la cantidad de agua que podría ser almacenada se incrementó considerablemente, reduciendo las pérdidas por evaporación. En segundo lugar, las cisternas servían como protección contra la contaminación del agua almacenada. Pese a que las casas más sofisticadas seguían teniendo la piscina de poca profundidad en el atrio (mayormente por sus efectos microclimáticos), la mayoría del agua de lluvia de los techos se conducía a las cisternas subterráneas. Sin embargo, el consumo de agua aumentó aún más, lo que llevó al desarrollo de un suministro centralizado de agua potable en zonas urbanas, proveniente de manantiales cercanos, y esto provocó el abandono de los SCALLs.

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. Asimismo, en Irán se encuentran los “abarbars”, sistemas tradicionales locales para la captación y almacenamiento de aguas lluvias (VI Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, 2006).

Por otro lado, en Centroamérica se conoce el caso del Imperio Maya. Los reyes mayas sostenían a sus pueblos de modos prácticos, ocupándose de la construcción de obras públicas, entre las cuales estaban aquellas destinadas a aprovisionar de agua a la población. Al sur de la ciudad de 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 hacían a través de una tecnología para el aprovechamiento de agua lluvia. El agua era recogida en un área de 100 a 200 m<sup>2</sup> y se almacenaba en cisternas llamadas “Chultuns”. Así, estas cisternas tenían un diámetro aproximado de 5 m 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. Mediante un sistema de depósitos, ese sistema permitió 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 m de ancho y 1 m de profundidad, para aprovechar el agua de lluvia. Este canal proporcionaba agua para beber y regar los cultivos.

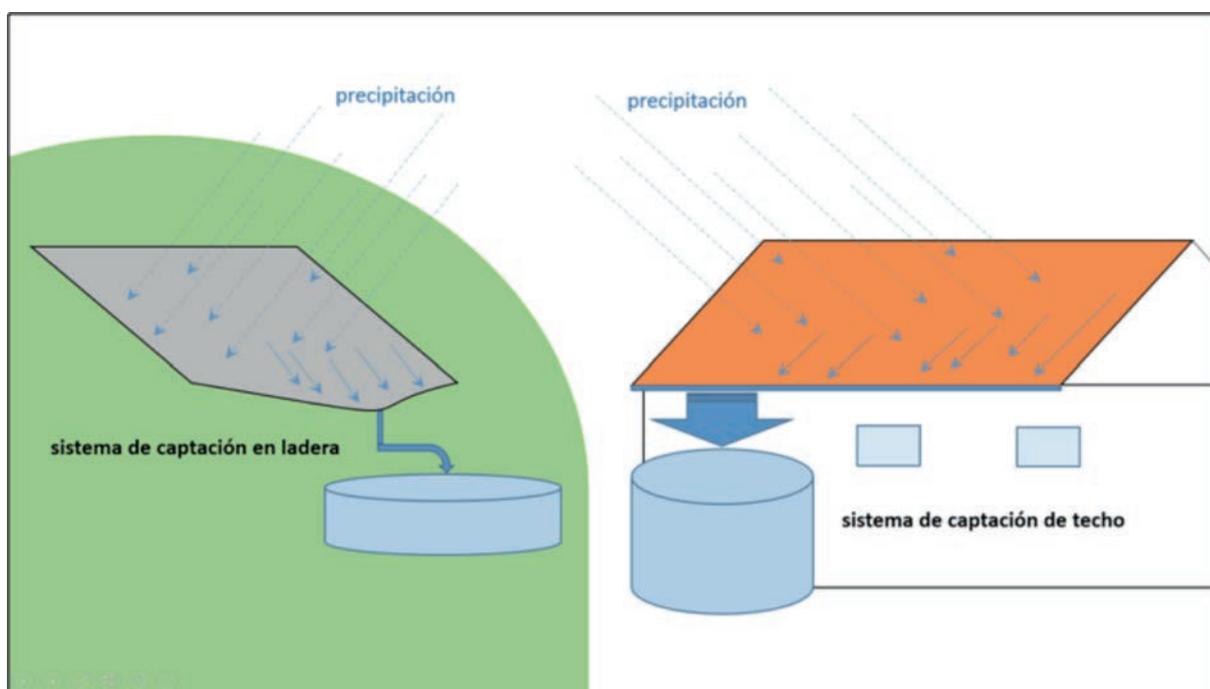
Siglos después, el uso de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias decreció debido a la imposición de métodos y obras para la utilización del agua superficial y subterránea (presas, acueductos, pozos de extracción y sistemas de irrigación). En la península de Yucatán se dejó de lado el aprovechamiento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

En el siglo XIX y XX, las ciudades de la mayoría de los países de Asia y de Europa experimentaron un gran crecimiento. En ese entonces se verificaba que el suministro de agua a la población fuera por medio de la captura de agua desde fuentes superficiales, para luego ser distribuida por una red centralizada de acueductos. En otras ocasiones se acudió a la explotación del agua subterránea. En cualquiera de los casos se eliminó la posibilidad de uso de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias 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, lo que ejerció presión sobre las fuentes finitas de agua. Por esto, se aprovechó el agua lluvia como alternativa para suplir necesidades básicas (Ballén *et al.*, 2006). 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 por sus altos costos.

Para Alfaro (2009), los sistemas de captación y aprovechamiento de aguas lluvias -como se define formalmente a los sistemas de captación de aguas lluvias (Rainwaterharvesting en inglés)- comprenden un conjunto muy amplio de prácticas tendientes a coleccionar 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. Así, los sistemas de captación desde los techos de las viviendas son el ícono de estos sistemas (Alfaro, 2009). Sin embargo, Ruskin (2001) señala que existen dos técnicas principales para la captación del agua lluvia, que 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 sistemas 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 (Fig. 3).



**Figura 3.** Técnicas para la Captación de Aguas Lluvias.

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. Estos 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), Recolección (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).

Sin embargo y a pesar de tener claridad acerca de los componentes de un sistema de captación de aguas lluvias, 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, el sistema de bombeo del agua almacenada y el sistema de tratamiento del agua de lluvia (Juan *et al.*, 2007). Este aspecto es cuestionado en zonas áridas y semiáridas, porque en estas zonas la media de la precipitación anual, es muy errática y con escasa probabilidad de ocurrencia, por lo que conviene usar probabilidades más bajas, como de un 5% o 10% de las precipitaciones anuales, después de ajustar los datos a una función de distribución de probabilidad. Asimismo, el Instituto Mexicano del Agua (IMTA, 2007) plantea que los cuatro factores importantes para el diseño de sistemas de captación de agua lluvia son la precipitación (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 solo para zonas rurales o urbanas marginales con niveles de precipitación 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, para obtener 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.

En cuanto a la disponibilidad, el criterio de suficiencia es definido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) entre 50 y 100 litros por persona al día, para cubrir la mayoría de las necesidades básicas y evitar la mayor parte de los problemas de salud. El acceso entre 20 a 25 litros por persona al día se estima como el mínimo, aunque esta cantidad suscita preocupaciones sanitarias, ya que no alcanza para cubrir necesidades básicas de higiene y consumo (Howard y Bartram, 2003).

## CAPÍTULO III

### III. PROPUESTA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUAS LLUVIAS EN ZONAS RURALES DE CHILE.

#### 3.1. Selección de Sitios.

En la selección de los sitios en que se implementará este tipo de obras, se deben considerar diversos aspectos, que deben ser afines con los objetivos que se plantean en cuanto al volumen y destino de los 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, especialmente para enfrentar la época estival.

Existen varias zonas a lo largo del país que durante todo el año no cuentan con disponibilidad de agua, inclusive 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, derivados de los efectos producidos por el déficit hídrico que afecta a estas zonas del país.

Un elemento principal a considerar desde un punto de vista social es la ruralidad de la zona, la superficie de la comuna y la población involucrada. Para una comuna, un primer criterio de selección son los sectores en donde el Municipio hace entrega de 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, es la accesibilidad del lugar y el espacio disponible para la construcción de las obras. Este aspecto es relevante, puesto que significará, en muchos casos, problemas para la implementación de la obra en terreno y/o aumentos considerables en los presupuestos que pueden definir la factibilidad técnica y económica de implementación de las estructuras.

De igual forma, se hace necesario establecer qué tipos de soluciones se van a implementar. Así, se pueden considerar las soluciones a nivel comunitario, que son de menor costo por metro cúbico de agua, por la economía de escalas o las soluciones a nivel individual que deberán destacar por ser soluciones de alto valor social. En ambas, se debe cumplir que la comunidad o grupo familiar denote escasas posibilidades o capacidad de acceder a otras fuentes alternativas del recurso.

Las características del propietario (responsabilidad, compromiso con la mantención de las obras, necesidad de agua, impacto potencial a producir) es otro elemento que se debe 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 construcción en zonas de cotas por sobre el punto que se desea abastecer, de modo que el agua pueda llegar desde este punto hasta cualquier lugar de la propiedad donde se desee disponer de ella. Sin embargo, no siempre es posible tener las condiciones adecuadas para lograr lo anterior. Si la estructura solo puede ubicarse en un punto con cota más baja que la zona a abastecer, entonces será necesario considerar la implementación de bombeo, en la que una alternativa recomendable son 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 selección del sitio adecuado para la implementación de un sistema SCALL es clave para el éxito en el funcionamiento del sistema.

### **3.2. 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; toda vez que a partir de este análisis se podrá definir la real capacidad de abastecimiento de agua, en función de las necesidades que una determinada zona posea.

#### **3.2.1. 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 deben utilizar los registros históricos de estaciones pluviométricas cercanas a los sitios en que se desean instalar los sistemas. Para conocer la precipitación anual y su comportamiento en el tiempo, es necesario consultar las bases de datos de la Dirección General de Aguas, la Dirección Meteorológica o cualquier otro ente afín con datos de precipitación de buena calidad. En esta etapa, pueden considerarse la o las estaciones más cercanas y con 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.

#### **3.2.2. 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.

##### **3.2.2.1. Definición de los estadígrafos de posición**

En primer lugar, para la serie de datos, se determinan por una parte 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. Indican, además, los estadígrafos de dispersión. Estos estadígrafos o estadísticos extraen información de una muestra, por lo que indican las características de la población:

- Media: 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:

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

- 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:

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

### 3.2.2.2. Definición de las Funciones de Distribución de Probabilidad.

Según Chow *et al.* (1994), al conjunto de observaciones  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , de la variable aleatoria, se 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 propone trabajar 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 agua disponible definida en el diseño. Esto se basa en que esta probabilidad es considerada rentable desde un punto de vista económico, ya que probabilidades superiores pueden establecer una estructura que en 99 de cada 100 años obtendrá la precipitación de diseño, pero ello determinará una subutilización muy alta de la infraestructura construida. Y esto se constituye en un alto costo de oportunidad. Por ello, se estima que un 90% es una probabilidad de éxito recomendable (Pizarro, 2004).

### 3.2.2.3. Ajuste a una Función de Distribución de Probabilidad.

Luego de la definición de la probabilidad de excedencia, se debe proceder a ajustar los registros de lluvias a una Función de Distribución de Probabilidad. Una de las más utilizadas es la de Gumbel, dado que ha demostrado poseer una adecuada capacidad de ajuste a precipitaciones, en distintos períodos de tiempo (Pizarro y Novoa, 1986).

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  $\mu$  = 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:

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

Otra F.D.P. conocida en hidrología es la función de Distribución de Goodrich, que 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. Posee la siguiente función de distribución de probabilidad (Pizarro *et al.*, 1985).

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

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

Para  $x_1 < x \leq \infty$

Donde:

X = Valor a asumir por la variable aleatoria

$\alpha$ , p y  $X_1$  = Parámetros a estimar en función de los valores de la muestra.

En tanto, los parámetros 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.

$\Gamma$  = Función Gamma.

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 8.1. 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 8.2., 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.

Una tercera F.D.P. importante de considerar es la Distribución Log-Normal, que tiene desventaja sobre la distribución normal, debido a que está limitada a  $X>0$ , y también que 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:

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

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

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

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

Donde:

$x$  = Representa el valor a asumir por la variable aleatoria.

$\alpha, \beta$  = Parámetros.

$e$  = Constante de Neper.

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

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

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

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

Otra función que puede proponerse, entre otras 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):

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

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:

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

Donde:

- $\gamma$  = Coeficiente de sesgo.
- $\alpha, \beta$  y  $\delta$  = Parámetros.
- S = Desviación típica.
- $\bar{X}$  = Media aritmética.

Asimismo la variable estandarizada  $\gamma$  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. En el Anexo 8.3. se presenta la tabla A3 con los valores a asumir por la función chi-cuadrado.

#### 3.2.2.4. 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 son muy utilizados 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:

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

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.  
 $F(X)_i$  = Frecuencia Teórica Acumulada.

Una vez obtenido el supremo de las diferencias, se compara con el valor de la tabla Kolmogorov-Smirnov. 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:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Fn(X)_i - F(X)_i)^2}{\sum(Fn(X)_i - \overline{Fn(X)})^2}$$

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.

$\overline{Fn(X)}$  = Media de las Frecuencias observadas acumuladas.

### 3.2.3. 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, interesará 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 1 se presentan valores de eficiencia del escurrimiento del agua en base a distintos materiales y coberturas de suelo.

Tabla 1. 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:	0,05 a 0,35
Terrenos granulares	0,15 a 0,50
Terrenos arcillosos	
Zonas con vegetación media:	0,10 a 0,50
Terrenos granulares	0,30 a 0,75
Terrenos arcillosos	
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. Para calcular el área de captación requerido, debe determinarse el escurrimiento esperado durante la época de lluvias, por lo que se emplea la fórmula racional:

$$Q = C * i * A / 3,6$$

Donde:

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/s).

C = Coeficiente de escorrentía

i = Intensidad de la lluvia (mm/h) para el período de retorno de diseño y una duración igual al tiempo de concentración

A = Área de drenaje en Km<sup>2</sup>

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 C=1,0 ó 0,9 para los SCALLs construidos en geomembrana y cercano a C=0,85 en el caso del hormigón armado revestido con algún producto impermeabilizante.

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

Este sistema consta de tres partes principales:

#### 3.3.1. 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<sub>cap</sub> = Área de captación en la ladera (m<sup>2</sup>).

V<sub>c</sub> = Volumen de la cisterna y/o volumen a capturar por año (m<sup>3</sup>).

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

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

### 3.3.2. 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.

### 3.3.3. 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 con que se pretende construir la cisterna, la que 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 siguiente figura se muestra el esquema de un sistema de captación y acumulación de aguas lluvias de ladera.



**Figura 4.** 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. Construcción del sistema de captación y acumulación en hormigón armado, para un volumen de acumulación de 30 m<sup>3</sup> y un área de captación de 80 m<sup>2</sup>.

### 3.4. Definición, Selección y Combinación de Materiales.

En esta etapa, se procede 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, por su bajo costo y por su eficiencia en el escurrimiento, la Geomembrana HD de 1 mm de espesor. Para la cisterna de acumulación se recomiendan los mencionados en el punto anterior, 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. Este último está directamente relacionado con las demandas de agua de cada familia o comunidad en donde se focalizarán los SCALLs.

### 3.5. Ejemplo

El ejemplo a considerar contempla la estación San Rafael (Latitud Sur: 35°18'23"; Longitud Oeste: 71°31'24"), ubicada en la Región del Maule. Para ejemplificar se considerará un período de registro que está comprendido entre los años 1992 – 2013 (22 datos anuales de precipitación). A estos datos se ajustará la Función de Distribución de Probabilidad de Gumbel.

En este marco, para la serie de datos se determinaron los estadígrafos de posición. En la tabla 2, se entrega la información pluviométrica de la estación a trabajar y los estadígrafos media y desviación estándar, necesarios para comenzar a ajustar la función.

#### 3.5.1. Cálculo de la FDP de Gumbel

Posteriormente, con el resultado de los estadísticos media y desviación estándar, 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  $\mu$ :

$$d = \frac{1}{0,779696 * 228,82} = 0,005605 \quad ; \quad \mu = 651,67 - 0,450047 * 228,82 = 548,6939$$

Una vez determinados los parámetros de Gumbel, ya está ajustada la función. Pero se debe verificar si dicho ajuste es de calidad. Para ello, primero se debe ordenar la variable aleatoria en forma creciente (ver Tabla 2) y posteriormente se debe determinar la frecuencia observada acumulada  $F_n(x)$  y la frecuencia teórica acumulada  $F(x)$ , por medio de las ecuaciones presentadas en el ítem 3.2.2. del presente manual.

**Tabla 2. : Información de precipitación anual (mm) estación San Rafael.**

	San Rafael	
	Pp anual	Pp ordenada de menor a mayor
1992	261,50	242,40
1993	583,10	261,50
1994	433,90	433,90
1995	628,90	440,90
1996	440,90	460,50
1997	1026,40	490,50
1998	242,40	536,10
1999	768,60	546,10
2000	770,80	583,10
2001	946,90	584,90
2002	1055,30	601,50
2003	645,90	628,90
2004	663,20	645,90
2005	955,00	663,20
2006	876,40	768,60
2007	460,50	770,80
2008	818,00	818,00
2009	601,50	876,40
2010	536,10	946,90
2011	546,10	955,00
2012	584,90	1026,40
2013	490,50	1055,30
<b>Promedio</b>	651,67	
<b>Desviación Típica</b>	228,82	

A continuación, se presenta en la tabla 3 el cálculo de la frecuencia observada acumulada  $F_n(x)$ , la frecuencia teórica acumulada  $F(x)$ , así como la diferencia entre ambas variables.

El Supremo es el valor máximo de la columna 6 y corresponde al estadígrafo de Kolmogorov-Smirnov.

Una vez obtenido el supremo de las diferencias, este valor se compara con el valor de la tabla Kolmogorov-Smirnov. Si el valor obtenido de la tabla K-S ( $D_t$ ) (Tabla A4, en el Anexo 8.4.), es mayor que el supremo de las diferencias ( $D_c$ ), se puede aceptar la hipótesis nula ( $H_0$ ) que indicaría que se está en presencia de un buen ajuste con el nivel de confianza asumido ( $D_t > D_c$ ) (Ver ítem 3.2.2.4. del manual).

Por otra parte, para calcular el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ) se debe considerar la ecuación presentada en el ítem 3.2.2.4. Dicho coeficiente es un indicador que mide cuál proporción o porcentaje de la variación total de la variable dependiente es explicada en este caso por la función de distribución de probabilidad.

Luego, en la tabla 4 se presentan los resultados de las pruebas de bondad del ajuste (Test Kolmogorov-Smirnov y Coeficiente de Determinación), para el ejemplo de la función de Gumbel desarrollado.

**Tabla 3. Ejemplo para el ajuste de la FDP de Gumbel, con datos de precipitación anual (mm) de la estación San Rafael.**

San Rafael (Huilliborgoa)					
	Pp anual	Pp ordenada de menor a mayor	Weibull Fn(X) Frecuencia Relativa	Gumbel F(X) Frecuencia Teórica	Diferencias (Fn(X)-F(X))
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

**Tabla 4. Resultados test de bondad del ajuste Gumbel**

FDP Ajustada	Dc	Dt <sub>0,95</sub>	Ajuste K-S	R <sup>2</sup>
Gumbel	0,0949	0,2809	Acepta Ho	0,9793

Los resultados de esta tabla indican que el valor Dc=0,0949 es menor que el valor Dt=0,2809, obtenido de la tabla K-S con un 95% de confianza ( $\alpha=0,05$ ; n=22), con lo que se cumple la condición de un buen ajuste K-S.

Por otra parte, el Coeficiente de Determinación R<sup>2</sup> 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 de calcular el  $R^2$ , para que quede mejor ejemplificado y de acuerdo a la tabla 3, es la siguiente:

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

Finalmente, es necesario conocer el valor a asumir por la variable aleatoria (precipitación, caudal, etc.) para cierto período de retorno asociado, de tal manera de poder predecir posibles eventos futuros y poder tomar decisiones de gestión. Para esto se pretende despejar dicha variable y calcular su valor asociado a la probabilidad de diseño. Al despejar el valor de la variable aleatoria de la función original, se obtiene la siguiente expresión que será utilizada para el diseño del SCALLs.

$$F(X) = e^{-e^{-d(X-\mu)}} \rightarrow X = \mu - \frac{\ln(-\ln(F(X)))}{d}$$

Donde:

X = Valor a asumir por la variable aleatoria (precipitación de diseño).

d y  $\mu$  = Parámetros a ajustar de la función.

e = Constante de Neper.

### 3.5.2. Cálculo de la probabilidad de excedencia, precipitación de diseño y área de captación del SCALLs.

Para el cálculo de la precipitación de diseño del SCALLs, es necesario definir cuánto es el nivel de eficiencia que se quiere satisfacer. En este caso se recomienda ajustar con una probabilidad del 10%, lo que corresponde a que en 9 de cada 10 años, se pueden llenar las cisternas para garantizar que una cierta cantidad de metros cúbicos estén disponibles cada año.

Así, el valor de la variable aleatoria (en este caso precipitación anual para el diseño de SCALLs), si se asume la probabilidad 10% y los parámetros asociados a la F.D.P ajustada anteriormente, queda determinada de la siguiente forma:

$$X = 548,6939 - \frac{\ln(-\ln(0,1))}{0,0056} = 399,9 \text{ (mm)}$$

Luego, si se tiene esta precipitación de diseño y se ha determinado por ejemplo que para satisfacer las necesidades básicas de agua durante los meses de verano, en consumo doméstico de una familia; es necesario contar con una provisión de 50 m<sup>3</sup>. Es necesario también realizar un cálculo para definir el área de captación necesaria para satisfacer dicho volumen de captura en 9 de cada 10 años al menos.

Por tanto, y asumiendo que se construirá el área de captación con una geomembrana que presenta un coeficiente de escorrentía de 0,85, entonces se tiene lo siguiente:

$$A_{cap} = \frac{V_c}{P * C} = \frac{50}{0,3999 * 0,85} = 147,1 \text{ m}^2$$

Donde:

Acap = Área de captación en la ladera ( $m^2$ ).

Vc = Volumen de la cisterna ( $m^3$ ).

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

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

Por lo tanto, la necesidad es de impermeabilizar un área de 147,1  $m^2$ .

## CAPÍTULO IV

### IV. CONSTRUCCIÓN SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y ACUMULACIÓN DE AGUAS LLUVIAS, SCALLS.

#### 4.1. Replanteo en Terreno.

Una vez determinados los aspectos de ingeniería de detalle de las obras, previo al proceso de construcción, se deberá realizar 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 fuese así se deberán realizar correcciones de diseño, con la finalidad de asegurar la congruencia entre el diseño y las características específicas del sitio en donde tomarán lugar las obras. Esto implica que en el terreno se determinará el emplazamiento de las obras de toma de agua y de captación (cisternas), para poder verificar las pendientes adecuadas, las distancias necesarias, los obstáculos de terreno y todo lo necesario para la adecuada implementación de las obras.

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 hormigones, 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. Por esto deben evitarse en lo posible, o bien, recubrirse 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 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 lo que 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 SCALL cuya fuente de agua sea un techo, es conveniente ubicarlo cerca de la construcción, para reducir costos en las tuberías de transporte del agua. De igual forma, el SCALL debe estar ubicado lo más cerca posible del lugar donde se utilizará el agua.

#### 4.2. Etapas de Construcción.

Las etapas de construcción de las obras son las siguientes:

#### 4.2.1. Construcción 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 5).
- **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 6).
- **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, la empresa constructora Makon 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 7 y 8).



Figura 5. Trazado.



Figura 6. Limpieza y escarpado.



Figura 7. Movimiento de tierra con retroexcavadora



Figura 8. 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 emplaza la geomembrana, se debe proceder a ejecutar las distintas labores de construcción de la estructura de soporte. Para esto es necesario el trabajo de carpintería y la utilización de herramientas de mano, tales como pala, chuzo y barreno (en algunos casos es necesario por la dureza del terreno) (Figuras 9 y 10).

### Materiales utilizados:

- Polines impregnados de 3”.
- Listones impregnados de 2”x3”.
- 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. Como se muestra en la figura 11, donde los polines de la parte baja son más altos que los de la parte alta, con el objetivo de suplir esta diferencia de nivel y 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 2”x3” 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 12. Esta pieza hará que la geomembrana trabaje mecánicamente mejor a la dilatación y la contracción.



**Figura 9.** Trabajo de carpintería, corte de los polines



**Figura 10.** Trabajo de perforaciones con el barreno.



**Figura 11.** Estructura de soporte en polines impregnados enterrados.



**Figura 12.** 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, una máquina placa compactadora de embriague normal con frecuencia de vibración de 6500 vpm, pues esta 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 terreno 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 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, se 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 17.

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



**Figura 13.** Corte de la geomembrana para su fusión,



**Figura 14.** Fusión de la Geomembrana.



**Figura 15.** Instalación de la geomembrana en la estructura de soporte del área de captación.



**Figura 16.** Sellado y soldado de la geomembrana.



**Figura 17.** Zanja perimetral en donde va enterrada la geomembrana.



**Figura 18.** 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.

#### **4.2.2. 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. 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.

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.

Nivelado: Se puede lograr un buen nivelado de la base del estanque, 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 19.** Trabajos de maquinaria en el movimiento de tierra y excavación del área de acumulación.



**Figura 20.** Trabajos de maquinaria para el movimiento de tierra.



**Figura 21.** Área de acumulación.



**Figura 22.** 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 debería tener ningún tipo de pendiente. Sí debería 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 23.** Trazado zona de acumulación.



**Figura 24.** Limpieza del sitio demostrativo.



**Figura 25.** Parte del cerro que tiene que rebajarse para la zona de acumulación.



**Figura 26.** Movimiento de tierra con retroexcavadora.



**Figura 27.** Excavación con herramienta de mano.



**Figura 28.** Área donde se emplazará el hidroacumulador de PVC



**Figura 29.** Instalación del hidroacumulador de PVC.



**Figura 30.** 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 34, es un inconveniente la presencia de rocas que podrían dificultar la compactación.



**Figura 31.** Limpieza del terreno.



**Figura 32.** Trazado del área de acumulación.



**Figura 33.** Movimiento de tierra.



**Figura 34.** Presencia de grandes rocas extraídas con la retroexcavadora.



**Figura 35.** Excavación área de acumulación.



**Figura 36.** 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 37.** Zona en donde se emplazará la unidad demostrativa.



**Figura 38.** Movimiento de tierra y excavación de la zona de acumulación.



**Figura 39.** Enfierradura con malla Acma C- 139.



**Figura 40.** Trabajos de carpintería de moldaje para recibir el hormigón.



**Figura 41.** Instalación de moldajes.



**Figura 42.** Hormigonado del área de acumulación.

#### 4.2.3. 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 43.** Instalación del sistema.



**Figura 44.** Rejilla plástica como filtro sencillo. de conducción.

#### 4.2.4. 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 45 y 46).



**Figura 45.** Cierre perimetral.



**Figura 46.** Puerta de acceso.

## CAPÍTULO V

### V. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA DEL SISTEMA

#### 5.1. Recomendaciones para el Estudio de Calidad de Aguas en Sistemas de Captación de Aguas Lluvias.

Producto de que la captación de aguas lluvias se plantea 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 colectada 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 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.

##### 5.1.1. 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 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”.

###### b) Obtención de muestras de aguas

Considerando que los muestreos se realizan en distintos tipos de cisternas que se distinguen por su diseño y tipo de construcción característico, se debe 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 deben 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 debe realizar en envases de polietileno y de vidrio. Los envases de polietileno deben ser lavados con una solución de detergente y luego con ácido clorhídrico concentrado de pureza técnica. Luego son enjuagados con agua corriente y tres veces con agua bidestilada. Los envases de vidrio se lavan con detergente y luego con mezcla sulfocrómica. Posteriormente, se enjuagan 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.

### **c) Metodologías de análisis**

En terreno se deben medir los parámetros temperatura, pH y conductividad. Para ello se utilizan, respectivamente, un sensor de temperatura, un peachímetro y un conductivímetro. Además, se puede realizar la medición de fijación de oxígeno disuelto de acuerdo al método Winkler (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater).

Las muestras de aguas colectadas en envases de vidrio y polietileno pueden ser filtradas en sistemas de policarbonato, para lo que se utilizan filtros de 0,45  $\mu\text{m}$  de porosidad. Las muestras filtradas permiten 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 <sub>4</sub> 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 <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 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 <sub>3</sub> 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/100ml
Coliformes fecales	1°,2°	Vidrio estéril	Refrigeración*	0,25	Tubos múltiples	2	NMP/100ml

(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 <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,06
Arsénico	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Hidruro	0,005
Bario	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,1
Berilio	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Cobre	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,02
Cromo	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> 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 <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,02
Litio	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Manganeso	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,02
Mercurio	v	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Vapor Frío	0,0005
Molibdeno	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,01
Níquel	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Plata	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,01
Plomo	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05
Selenio	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> 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
Vanadio	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> pH < 2	1 mes	E.A.A Llama	0,05 NTU
Zinc	P o V	Acidificar con HNO <sub>3</sub> 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

### 5.1.2. 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 <sub>3</sub>	50
Nitritos	mg/L NO <sub>2</sub>	3
Razón nitrato + nitrito	--	1
Plomo	mg/L Pb	0,05

#### 7.3 Parámetros relativos a características organolépticas

Parametros	Unidad	Límite máximo
<b>Físicos</b>		
Color verdadero	Pt/Co	20
Olor	-----	Inodora
Sabor	-----	Insípida
<b>Inorgánicos</b>		
Amoníaco	mg/L NH <sub>3</sub>	1,5
Cloruros	mg/L Cl -	400
pH	-----	6,5 – 8,5
Sulfatos	mg/L SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	500
Sólidos disueltos totales	mg/L	1500
Turbidez	NTU	4,0
<b>Orgánicos</b>		
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 <sub>3</sub>	> 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
Cadmio (Cd)	mg/L	0,010
Cianuros (CN <sup>-</sup> )	mg/L	0,20
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	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 <sup>-</sup> )	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 <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	250,0
Turbiedad	NTU	50,0
Vanadio (V)	mg/L	0,10
Zinc (Zn)	mg/L	2,0

V. N.: Valor Natural; S/N: Sin Norma

### 5.1.3. Resultados

De los resultados obtenidos para la NCH 409 (agua potable), es esperable que todos los parámetros alcancen niveles de calidad si las cisternas han realizado un adecuado almacenamiento del agua y esta ha sido preservada cuidándola de dejarla expuesta a la luz. Es esperable también que en algunas zonas no se cumpla 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 debería ser cumplida en general con mayor facilidad que la norma de agua potable. Aun así, hay algunos parámetros que en algunos casos podrían no cumplir la norma, como es el caso del sodio porcentual y el otro es 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 de 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 supere la normativa vigente, se puede remediar con un proceso de cloración similar al que se utiliza para el agua potable.

## CAPÍTULO VI

### VI. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES.

En este capítulo se presentan características de los SCALLs utilizados en Estados Unidos y México.

#### 6.1. Sistemas Urbanos de Captación de Aguas Lluvias (SCALLs) en los Estados Unidos.

**Pablo A. García-Chevesich, Ph. D. University of Arizona, Department of Hydrology and Water Resources.**

##### 6.1.1. Introducción.

Una manera simple y eficaz para maximizar los abastecimientos de agua es la captación y almacenamiento de agua de lluvia. Durante milenios, las civilizaciones han reconocido los beneficios de almacenar las aguas pluviales. 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, que recibe a veces no más que cinco pulgadas (13 mm) 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. El amplio espectro de lo que constituye la captación de la lluvia abarca estructuras tan simples como un barril o pequeño estanque, a estructuras lo suficientemente grandes como para usos recreativos y navegación, y sistemas carentes de estructuras, como simplemente desviar el agua de lluvia a un jardín o huerta.

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

Los sistemas activos de captación de agua de lluvia, por otro lado, utilizan estructuras de contención que almacenan agua de lluvia, para ser posteriormente utilizada. Los sistemas activos pueden tener tubos, canaletas, bombas hidráulicas y sistemas de filtrado y son generalmente 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 almacenamiento subterráneo y grandes cisternas de almacenamiento sobre el suelo. Los usos del agua almacenada pueden variar entre riego de jardines y huertas, usos domésticos y hasta uso potable para personas y animales. 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 (SCALL) 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, para luego finalizar con las prácticas y las alternativas de diseño de SCALLs.

### **6.1.2. Breve historia de los SCALLs.**

La captación y el almacenamiento de agua de lluvia no es una tecnología nueva. 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, que 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.

Roma fue un ejemplo notable del uso de las aguas lluvias para satisfacer las demandas de las ciudades, por lo que se constituyó como el mayor ejemplo de uso de estas técnicas en la antigüedad. Pero, y pese a que la recolección y el almacenamiento de agua de lluvia 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 sucedía en zonas semidesérticas, donde se construían viviendas sin manantiales o pozos en los alrededores. Así, los SCALLs se han utilizado en zonas tan diversas 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, en combinación con la alta necesidad de un suministro de grandes cantidades de agua para la industria y el alto nivel de higiene hídrica que se lograba a través de centrales de tratamiento.

No obstante lo anterior, los SCALLs están ganando importancia nuevamente, mayormente en zonas rurales y especialmente en muchos países en desarrollo. La situación actual en los países en desarrollo 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.

### **6.1.3. 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. Se incluyen en ellos, los cambios en los patrones de precipitación global, y dentro de estos las sequías son las más devastadoras. Estas variaciones climáticas naturales se han producido como consecuencia de 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 diversas técnicas indígenas de captación y almacenamiento del

agua de lluvia, como una adaptación a los cambios climáticos (sequías). Existen numerosos estudios que han documentado cambios climáticos abruptos y condiciones de sequía extrema a lo largo del actual territorio estadounidense, durante el Holoceno. La famosa gran sequía 'Dust Bowl' impactó severamente a Estados Unidos durante los años 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 crecimiento 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, que perduró por siete años (1606-1612).

Aparentemente, la existencia de más de 2,6 millones de pequeños cuerpos de agua artificiales pudo ser una técnica de adaptación a las fluctuaciones climáticas de antaño. Además, en muchas partes del territorio estadounidense 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 los cambios climáticos globales actuales son consecuencia del aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, especialmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). 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:

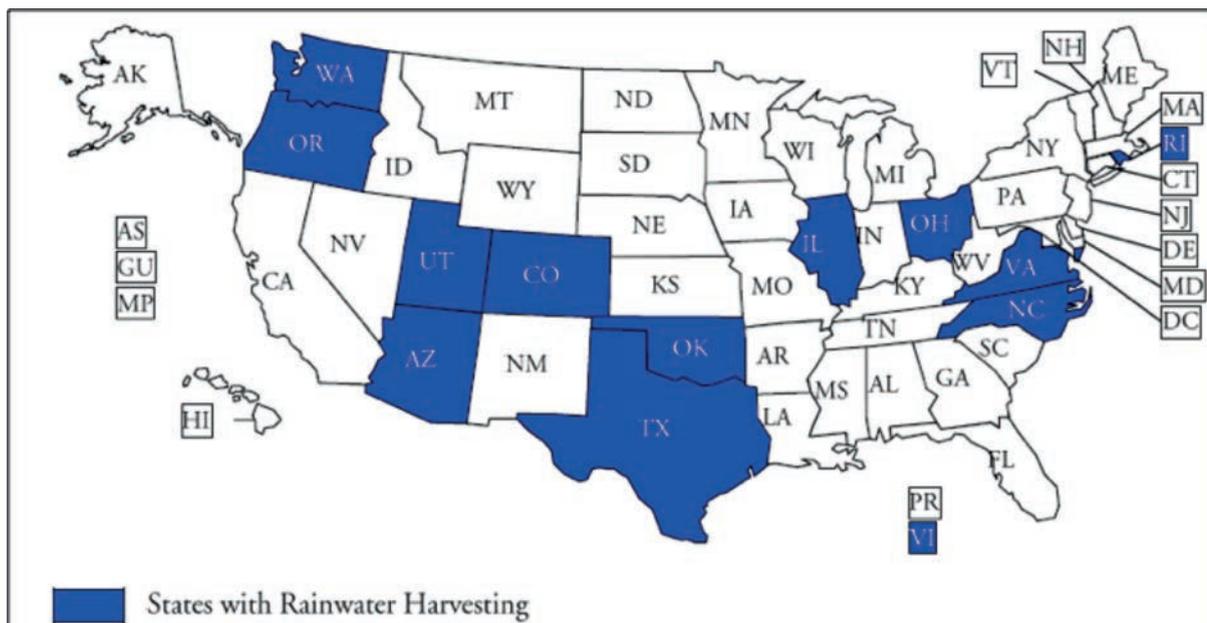
- Más de la mitad de la escorrentía de agua dulce accesible a nivel mundial ya está asignada para uso humano.
- Más de  $1 \times 10^9$  personas actualmente no tienen acceso a agua potable.
- Puesto que la población humana crecerá más rápido que los incrementos en la cantidad de agua dulce disponible, la disponibilidad de agua dulce per cápita 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.

#### **6.1.4. 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 permitirá definir y clarificar cuándo la captura y acumulación de agua de lluvia puede realizarse (Fig. 47.). Según las leyes

estadounidenses, la captura de agua de lluvia es el acto de utilizar un sistema de recolección de agua de lluvia para su 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.



**Figura 47.** Mapa de los estados norteamericanos que han incorporado la captura de aguas lluvia dentro de su sistema legal. Imagen cortesía de National Conference of State Legislatures, 2012.

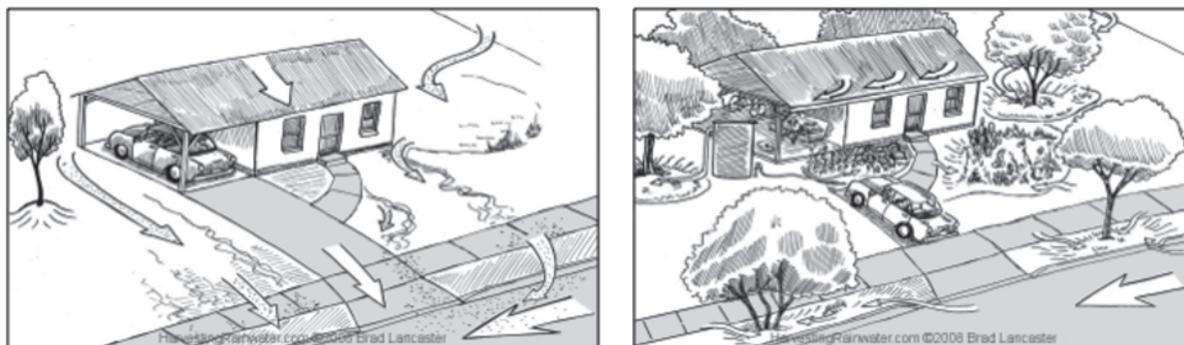
Cada Estado debe garantizar los estándares de calidad del agua capturada con el fin de asegurar la salud pública. Por ende, los estándares a cumplir se encuentran en función de qué uso se le dará al agua de lluvia. Para sistemas urbanos, lo más común es irrigación, por lo cual el nivel de exigencia es menor para 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, puesto que tienen numerosas leyes promulgadas 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. Tanto Texas como Ohio permiten abiertamente la práctica de capturar agua de lluvia, incluso 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.

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. Es obligatorio en la mayoría de las construcciones nuevas. También tienen instituciones financieras involucradas y estrictos estándares de calidad, lo que fuerza a cada condado para que promuevan 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 SCALL, 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.

### 6.1.5. 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 48. Estas categorías se clasifican según dónde se encuentra el área de captación: techos, jardines y calles.



**Figura 48.** 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](http://www.HarvestingRainwater.com).

#### 6.1.5.1. Captación de agua de lluvia en techos

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

La superficie que recibe la lluvia y genera la escorrentía a almacenar es el área de captación del SCALL. 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 (Fig. 49.), 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.



**Figura 49.** El tipo de techo puede influir significativamente en la cantidad y calidad de la escorrentía generada. Fuente: [www.roof.bz](http://www.roof.bz).

A diferencia del metal (Figura 49, derecha), que es utilizado profusamente en techos de construcciones rurales, se prefiere evitar el uso de tejas de arcilla u hormigón (Figura 49, izquierda), 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, considerando 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 (Figura 49, centro), alquitrán o grava son menos comunes aún, 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 conllevan el agua a tuberías y así 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 “First Flush”), que dirige el primer flujo de la escorrentía generada a un tubo dispuesto en forma vertical (Figura 50). Este 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, donde es 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 recomiendan 3 litros por cada 5 m<sup>2</sup> 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 (vaciar) después de cada tormenta.



**Figura 50.** 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 (derecha). Fuente: [www.rainharvest.com](http://www.rainharvest.com) y [www.acmesand.com](http://www.acmesand.com).

Para eliminar los residuos que se depositan sobre el techo, es necesario instalar una serie de filtros que eliminan dichas basuras para evitar que estas lleguen al tanque de almacenamiento. Las barreras para mantener los residuos fuera de un SCALL están representadas por pantallas o redes que atrapan las hojas a lo largo de la canaleta (Figura 51). Los filtros foliares son por lo general pantallas de malla de  $\frac{1}{4}$  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 adecúe a su situación en particular.



**Figura 51.** 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.armorexteriorsinc.com](http://www.armorexteriorsinc.com).

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 50, izquierda y Figura 51a), 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 51b) o similares son también populares en dichos ambientes.

Independientemente del material, el tamaño de la cisterna está en función de 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, porque así 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.

Los tanques deben estar ubicados lo más cerca posible a los puntos de oferta y de demanda, con el fin de reducir el transporte de agua a distancia. Los tanques de almacenamiento 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.



**Figura 51a.** Las cisternas de almacenamiento galvanizadas han demostrado ser las más eficientes en zonas de escasa pluviometría. Fuente: Acme Sand & Gravel, [www.acmesand.com](http://www.acmesand.com).



**Figura 51b.** Las cisternas de PVC o materiales resistentes similares también han adquirido mucha popularidad. Fuente: [www.austinwatertanks.com](http://www.austinwatertanks.com).

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. Si se trata de una cisterna de PVC, estas simplemente vienen 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 esta 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 que 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 52.



**Figura 52.** Sistema de plomería de una cisterna galvanizada, que 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](http://www.southernarizonaraingutters.com).

#### 6.1.5.2. Sistemas de captación de agua de lluvia en áreas verdes comerciales y

### residenciales, estacionamientos y calles.

La captura de agua en jardines es 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; lo que evita que salga de la propiedad e incentiva su infiltración dentro de los horizontes del suelo (Figura 53). 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 de la captación 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 captación 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 53.** Principios básicos para el diseño de un sistema de captación de aguas lluvias en jardines y calles. Imágenes cortesía de Brad Lancaster, [www.HarvestingRainwater.com](http://www.HarvestingRainwater.com).

Un sistema de este tipo por lo general consta de un área de captación y un medio de distribución, que opera por gravedad. El agua se deposita en un área de retención dentro del paisaje, por ejemplo una zona cóncava o un área plantada en donde se almacena el agua. Esta zona puede ser utilizada inmediatamente por las plantas, o bien almacenada 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 captación 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 desee 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 bien, las aceras que están 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 desee irrigar (Figura 54). 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. Y es ahí 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, un área de almacenamiento puede ser diseñada para llenarse y luego fluir hacia otras depresiones ubicadas más abajo, mediante microcanales o similares.



**Figura 54.** Construcción de una zona de almacenamiento, que evita que la escorrentía generada en la propiedad llegue a la calle. Imagen cortesía de Watershed Management Group, [www.watershedmg.org](http://www.watershedmg.org).

Mediante la simple observación del paisaje durante una tormenta, es posible identificar

los patrones de drenaje existentes en una propiedad. Esto permite 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, ubicadas en aquellas porciones del terreno que se encuentren inclinadas (Figura 55), 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 aguas lluvias provenientes 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 56).



**Figura 55.** La construcción de terrazas representa una excelente forma de capturar el agua de lluvia, ya sea directamente o por la acumulación de la escorrentía generada en otras zonas pendientes arriba. Fuente: [www.HarvestingRainwater.com](http://www.HarvestingRainwater.com).



**Figura 56.** 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](http://www.HarvestingRainwater.com) y Watershed Management Group, [www.watershedmg.org](http://www.watershedmg.org).

La infraestructura verde siempre involucra especies nativas arbóreas, arbustivas y herbáceas (generalmente plantas con flores); también 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 57). Algunos ejemplos de infraestructura verde se ilustran en las figuras 58a y 58b.

Por otra parte, ya sea en malls comerciales, 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 57.** 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](http://www.watershedmg.org).



**Figura 59a.** Vista antes y después de la aplicación de la metodología de infraestructura verde junto a rutas peatonales impermeables, en 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](http://www.HarvestingRainwater.com).



**Figura 58b.** El concepto de infraestructura verde se puede aplicar prácticamente en cualquier sitio que se ubique cerca de un área impermeable. Imágenes cortesía de Brad Lancaster, [www.HarvestingRainwater.com](http://www.HarvestingRainwater.com).

A modo de ejemplo, cabe mencionar que 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 litros 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 (figuras 59a, 59b y 59c). 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 59a.** 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](http://www.HarvestingRainwater.com).



**Figura 59b.** Las nuevas leyes norteamericanas obligan a establecer zonas de retención de la escorrentía generada por los estacionamientos, las que se han aprovechado para establecer árboles, lo que reduce significativamente la temperatura mediante el efecto isla. Imágenes cortesía de Brad Lancaster, [www.HarvestingRainwater.com](http://www.HarvestingRainwater.com).



**Figura 59c.** Para asegurar que todas las plantas dispongan de suficiente agua dentro de las zonas de acumulación, la cuenca se divide en sub-cuencas, cada una contando con su propia entrada de escorrentía. Imágenes cortesía de Brad Lancaster, [www.HarvestingRainwater.com](http://www.HarvestingRainwater.com).

#### 6.1.6. Agradecimientos.

El autor de este documento agradece profundamente las contribuciones de Brad Lancaster, experto en sistemas de captación de aguas lluvia, y de Watershed Management Group, Inc., una de las ONGs más experimentadas en temas de captación de aguas lluvia en los Estados Unidos. Además, se agradecen las valiosas contribuciones de Ron Kaczor, National Conference of State Legislatures, Roof Line, Inc., Rain Harvest Systems, Inc., Acme Sand&Gravel, Inc., Armor Exteriors, Inc., Austin Water tanks, Inc., y Southern Arizona Rain Gutters, Inc.

#### 6.2. Sistemas de Captación de Agua de Lluvia en Comunidades Rurales de

### **México.**

Miguel Córdova Rodríguez, Sandra Vázquez Villanueva, Erick Cervantes Gutiérrez, Dante Hernández Padrón, Rafael Hurtado Solórzano. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

#### **6.2.1. Resumen**

En México existen más de 180.000 localidades rurales (INEGI, 2010). De estas, 137.000 tienen una población menor a 100 habitantes, lo que representa una gran dispersión y por tanto, baja o nula cobertura de abastecimiento de agua. Adicionalmente, un alto porcentaje de estas regiones se caracteriza por ser zonas de alta precipitación. Sin embargo, el tipo de suelo permite escurrimientos e infiltraciones, por lo que carecen de fuentes superficiales y/o subterráneas de abastecimiento de agua. Por otra parte, existen localidades que extraen el agua de pozos a una profundidad mayor a los 200 metros, con los altos costos de bombeo que esto significa y la consiguiente escasez de recursos económicos para sufragar el costo de operación y mantenimiento de la red de agua potable. Aunado a lo anterior, el tipo de suelo y la distribución de las viviendas representan un alto costo de instalación de redes convencionales de distribución de agua. Por estas razones, la población recurre al abastecimiento de agua mediante la compra de agua en camiones aljibe durante la época de estiaje y en verano a la captación improvisada de agua de lluvia, para lo que la almacenan en recipientes de poca capacidad y, cuando las condiciones lo permiten, en reservorios comunitarios comúnmente conocidos como "ollas". Estas, en el mejor de los casos, son estanques impermeabilizados con geosintéticos, cuya operación a cielo abierto y la falta de áreas de captación protegidas y sin mantenimiento, resultan en el almacenamiento de agua. Con el paso del tiempo el agua resulta contaminada por la intrusión de animales, basura y sedimentos, además de la generación de algas por la incidencia de la radiación solar.

Para atender esta problemática, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), desde hace más de 20 años realiza proyectos para el diseño, adaptación y transferencia de tecnología para el abastecimiento mediante sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL), tanto a nivel de viviendas como a nivel comunitario. La implementación de los SCALL por parte del IMTA en México se realiza generalmente, en el marco de programas para la recuperación ambiental de cuencas. Entre las regiones atendidas se incluyen:

- ✓ La cuenca del Lago de Pátzcuaro, Michoacán.
- ✓ La región Huasteca de San Luis Potosí, San Luis Potosí.
- ✓ La región de los Altos de Morelos, Morelos.
- ✓ La cuenca del río Apatlaco, Morelos.
- ✓ Península de Yucatán (tres estados: Campeche, Yucatán y Quintana Roo).

Como áreas demostrativas de tecnologías apropiadas para el manejo integral del agua, se han implementado estas en viviendas de localidades ubicadas en los estados de Zacatecas, Chiapas, Michoacán y Estado de México.

En cada región, para realizar el proceso de selección de comunidades/beneficiarios, se aplica la metodología para la transferencia de tecnologías apropiadas en el medio rural, indígena y zonas periurbanas, que elaboró el IMTA a partir de la sistematización de la experiencia en este tipo de proyectos. El proceso se inicia con un diagnóstico socioeconómico y técnico para conocer y evaluar la situación con respecto a la infraestructura de abastecimiento y su

relación con la marginación. De los resultados obtenidos, se determinan el tipo y cantidad de tecnología(s) a transferir, se diseña la estrategia para la capacitación, la entrega de materiales, la instalación, la asesoría, la supervisión y el seguimiento.

A la fecha, se han instalado 1.910 sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) en viviendas de comunidades rurales marginadas, lo que representa un volumen de almacenamiento de 31.471 m<sup>3</sup>. A nivel comunitario, se instalaron 23 cisternas tipo capuchino, lo que representa un volumen de 4.141 m<sup>3</sup>. Se rehabilitaron y techaron 10 ollas de almacenamiento de agua de lluvia con lo que se recuperaron 30.727 m<sup>3</sup> para el almacenamiento del agua pluvial. Se diseñaron e instalaron dos modelos SCALL, uno de 2.800 m<sup>3</sup> instalado en la localidad de Felipe Neri, Tlalnepantla, Morelos, y el segundo, el más grande hasta ahora en México de 20.000 m<sup>3</sup> de capacidad, que está en proceso de instalación en la comunidad indígena autogobernada de Cherán, Michoacán.

### 6.2.2. Introducción.

Los SCALLs para uso doméstico y consumo humano a nivel de familia y comunitario representan una solución para abastecer en cantidad y calidad a poblaciones rurales, periurbanas y urbanas que sufren la carencia de este vital líquido y constan de los siguientes elementos:

- Área de captación.
- Sistema de retención (canaletas).
- Sistema de conducción.
- Almacenamiento.

**Área de captación.-** Es la superficie sobre la que cae la lluvia. Las áreas que se utilizan para este fin son los techos de casas habitación, escuelas, bodegas, invernaderos y laderas revestidas o tratadas con materiales que la impermeabilizan.

**Sistema de retención (canaletas).-** Las canaletas se instalan en los bordes más bajos del techo, en donde el agua de lluvia tiende a acumularse antes de caer al suelo. Estas canaletas deben contar con mallas que detienen basura, sólidos y hojas, para evitar la obstrucción del flujo en la tubería de conducción. Es necesario realizar labores de limpieza al inicio de la época de lluvias. En sistemas comunitarios, se utilizan sedimentadores o estructuras que permitan la separación de los sólidos antes de su ingreso al almacenamiento.

**Sistema de conducción.-** Es la tubería que conduce el agua retenida en las canaletas hacia el almacenamiento.

**Sistema de almacenamiento.-** Es la obra destinada a almacenar el volumen de agua de lluvia necesaria para cubrir las necesidades de las personas beneficiadas con este sistema, en especial durante el período de sequía.

La unidad de almacenamiento debe ser duradera y al efecto debe cumplir con las especificaciones siguientes:

- Impermeable para evitar la pérdida de agua por goteo o transpiración.
- Dotado de tapa para impedir el ingreso de polvo, insectos y de la luz solar.
- Disponer de una escotilla con tapa sanitaria lo suficientemente grande como para que

permita el ingreso de una persona para la limpieza y reparaciones necesarias.

- La entrada y el rebose deben contar con mallas para evitar el ingreso de insectos y animales.
- Dotado de dispositivos para el retiro de agua y el drenaje. Esto último para los casos de limpieza o reparación del tanque de almacenamiento. En el caso de tanques enterrados, deberán ser dotados de bombas de mano.

### **6.2.3. Consideraciones para el diseño de SCALLs.**

Para el diseño de los sistemas a nivel de vivienda y comunitarios, el IMTA aplica una metodología adaptada IMTA - Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI), del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas (COLPOS, 2007). Para el diseño se considera la siguiente información.

- Precipitación en la zona. Se deben conocer los datos pluviométricos de por lo menos los últimos 10 años, e idealmente de los últimos 15 años;
- Tipo de material del que está o va a estar construida la superficie de captación,
- Número de personas beneficiadas y
- Demanda de agua.

Los pasos para realizar el diseño de un sistema de captación son:

- a) Localización del sitio para establecer el sistema,
- b) Determinación de la demanda,
- c) Cálculo de la disponibilidad de agua,
- d) Diseño del área efectiva de captación de precipitación,
- e) Diseño del sistema de conducción del agua captada,
- f) Diseño del volumen del sedimentador o trampa de sólidos y
- g) Diseño del sistema de almacenamiento de agua captada.

#### **a) Localización del sitio.**

Cuando la captación se realiza en la vivienda, se debe tener en cuenta el tipo de material del techo ya que pueden liberar contaminantes al agua, o bien si son de materiales naturales, estos se deterioran y ensucian el agua.

Por otra parte, si la captación es comunitaria, se debe contar con la siguiente información:

- Planos de localización; población, energía eléctrica, vías de comunicación (carreteras);
- Superficie a construir;
- Considerar el volumen del movimiento de tierras;
- Situación legal del área seleccionada;
- Uso del suelo y actividades que se desarrollan en las colindancias del predio

#### **b) Determinación de la demanda.**

La cantidad de agua a utilizar dependerá de los usos en la vivienda y/o la comunidad.

$$D_j = \frac{Nu * Dot * Nd_j}{1.000} \quad ; \quad D_{anual} = \sum_{j=1}^{12} D_j$$

Donde:

- $D_j$  = demanda en el mes j en m<sup>3</sup>.
- Nu = número de usuarios que se benefician del sistema.
- Dot = dotación, en l/persona/día.
- $Nd_j$  = número de días del mes j.
- $D_{anual}$  = demanda de agua anual que necesita una población, en m<sup>3</sup>.
- j = es el índice del número del mes (j = 1, 2, 3, ..., 12)
- 1.000 = factor de conversión de litros a m<sup>3</sup>.

### c) Cálculo de la disponibilidad de agua

A partir de los datos promedio mensuales de precipitación de los últimos 10 ó 15 años se obtiene el valor promedio mensual del total de los años evaluados. Este valor puede expresarse en términos de milímetros de precipitación por mes, o litros por metro cuadrado y por mes que es capaz de colectarse en la superficie horizontal de techo. En México, esta información puede consultarse en la página del servicio Meteorológico Nacional ([www.smn.cna.gob.mx](http://www.smn.cna.gob.mx)).

### d) Cálculo de precipitación neta con coeficiente de captación

$$PN_{ijk} = P_{ijk} * \eta_{captación} \quad ; \quad C = \eta_{captación}$$

Donde:

- $PN_{ijk}$  = precipitación neta del día i, mes j y año k, en mm.
- $P_{ijk}$  = precipitación total del día i, mes j y año k, en mm.
- $\eta_{captación}$  = coeficiente de captación.

### e) Cálculo de la precipitación neta, método del Sistema de Conservación de Suelos (SCS).

Considera una pérdida hidrológica inicial, que es la detención superficial de la precipitación que no genera escurrimiento y que queda retenida en la superficie para evaporarse o infiltrarse.

$$PN_{ijk} = \frac{(P_{ijk} - P_o)^2}{P_{ijk} - P_o + S} \quad ; \quad S = \left[ \frac{1.000}{CN} - 10 \right] * 25,4 (mm) \quad ; \quad P_o = 0,2 * S$$

$$P_{ijk} = 0 \text{ si } P_{ijk} \leq P_o$$

- Donde:
- S = pérdidas máximas de precipitación, en mm.
  - CN = número de curva obtenida de cuadros (tiene un rango de 30 a 100)
  - $P_o$  = pérdida inicial o umbral, en mm
  - $P_{ijk}$  = precipitación del día i, mes j y año k, en mm.

**Tabla 9. Clasificación de suelos**

TIPO	
<b>A</b>	(Esguerrimiento mínimo). Incluye gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezclas de ambas.
<b>B</b>	Tipo B: Incluye arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.
<b>C</b>	Tipo C: Comprende arena muy fina, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.
<b>D</b>	Esguerrimiento máximo). Incluyendo principalmente arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie

**Tabla 10. El número de la curva de esguerrimiento (CN)**

N°	USO DEL SUELO O COBERTURA	NÚMERO DE CURVA, PARA EL GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
		A	B	C	D
1	Áreas urbanas completamente desarrolladas (vegetación establecida). Césped, espacios abiertos, parques, campos de golf, panteones, etc.				
2	Buena condición, cubierta de pasto el 75% o más del área	39	61	74	80
5	Lotes de estacionamiento pavimentados, techados, entrada de autos, etc.	98	98	98	98
6	Calles y caminos: Pavimentados con banquetas y drenaje de aguas pluviales	98	98	98	98
9	Pavimentados con cunetas	83	89	92	93
12	Rancherías, pueblos y zonas urbanas (65%) con lotes de 500m o menos	77	85	90	92

#### f) Diseño del área efectiva de captación de precipitación

Área de captación es el área superficial definida sobre la que el agua de lluvia cae y se conduce a un sistema de almacenamiento.

$$A_{ec} = \frac{D_{anual}}{P_{anual}}$$

Donde:

$A_{ec}$  = es el área efectiva de captación de agua de lluvia, en m<sup>2</sup>.

$D_{anual}$  = demanda de agua anual que necesita una población.

$P_{anual}$  = Suma de las precipitaciones netas medias mensuales que originan esguerrimiento (mm).

#### g) Diseño del sistema de conducción del agua captada

El agua pluvial captada en techos y áreas de esguerrimiento debe ser conducida al sistema de almacenamiento, mediante canaletas de lámina galvanizada y tubería de PVC.

$$Q_c = \frac{5}{18} (A_{ec} * I_{lluvia})$$

Donde:

$Q_c$  = Caudal de conducción, l/s.

$A_{ec}$  = es el área efectiva de captación de agua de lluvia, en m<sup>2</sup>

$I_{lluvia}$  = es la intensidad máxima de lluvia en la zona, 0,05-0,1 m/hora,

5/18 = factor de conversión de m<sup>3</sup>/hora a litros por segundo.

El diámetro se determina despejando el área de la ecuación de continuidad (Sotelo, 2005):

$$D = \sqrt[2]{\frac{Q_c}{\pi v}}$$

Donde

$D$  = diámetro de la tubería (mm);

$v$  = una velocidad propuesta (m/s).

#### h) Cálculo de la Intensidad de la Precipitación

La intensidad ( $I$ ) de la precipitación para una tormenta es la relación entre la lámina de precipitación ( $P$ ) el tiempo ( $t$ ) de duración de la tormenta, o sea es la pendiente de las gráficas producidas por el pluviógrafo. La intensidad máxima será la máxima pendiente observada para una tormenta, según la ecuación siguiente:

$$I = \frac{P}{t}$$

#### i) Diseño del volumen del sedimentador o trampa de sólidos

La sedimentación consiste en la separación, por la acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que la del agua.

$$\text{Donde: } V_{\text{sedimentador}} = A_{ec} * I_{\text{máx.}}$$

$V_{\text{sedimentador}}$  = Volumen del sedimentador, en m<sup>3</sup>.

$A_{ec}$  = Área efectiva de captación de agua de lluvia, en m<sup>2</sup>.

$I_{\text{máx}}$  = Precipitación máxima diaria en el periodo de registro, en mm.

### 6.2.4. Construcción.

#### 6.2.4.1. Área de captación

A nivel vivienda, en lo posible, se aprovecha el techo de la casa si este cumple con las dimensiones necesarias para captar la precipitación. En caso contrario, se debe calcular la superficie adicional e instalarla a una altura mayor del techo de la cisterna. Se deben evitar los techos de asbesto-cemento o de cartón con cubierta de emulsión asfáltica porque contienen contaminantes que pueden liberarse al agua, así como también por la suciedad que se genera por el deterioro de las láminas, no siendo apta para consumo humano.

Una vez definido el sitio de captación, se instala el sistema de conducción que permitirá

trasladar el agua pluvial desde el techo de las viviendas hasta un depósito de almacenamiento (cisterna). Con el diseño adecuado las pérdidas de agua durante la conducción son mínimas. Además, deberá contar con una trampa de sólidos, para retener partículas arrastradas por el agua e impedir su entrada hacia la cisterna, y así prevenir la contaminación del agua almacenada (Figura 60).

#### Instalación:

- El sistema de conducción utiliza canaletas galvanizadas y tubería de PVC de 4" de diámetro.
- Se determina el nivel presente en la losa de la vivienda.
- Se tiende un hilo que permita determinar la pendiente hasta una mínima del 2%. Este hilo servirá de guía para la inclinación que deben tener las canaletas.
- Se fijan los soportes de las canaletas fabricadas con solera de  $\frac{3}{4}$ " en la losa de la casa.
- Se colocan las canaletas verificando que conserven la pendiente del 2%.
- Al final de la última canaleta se coloca la tubería de PVC de 4" de diámetro.
- Se arma la trampa de sólidos.
- Se realiza la conexión canaletas-tubería-cisterna.

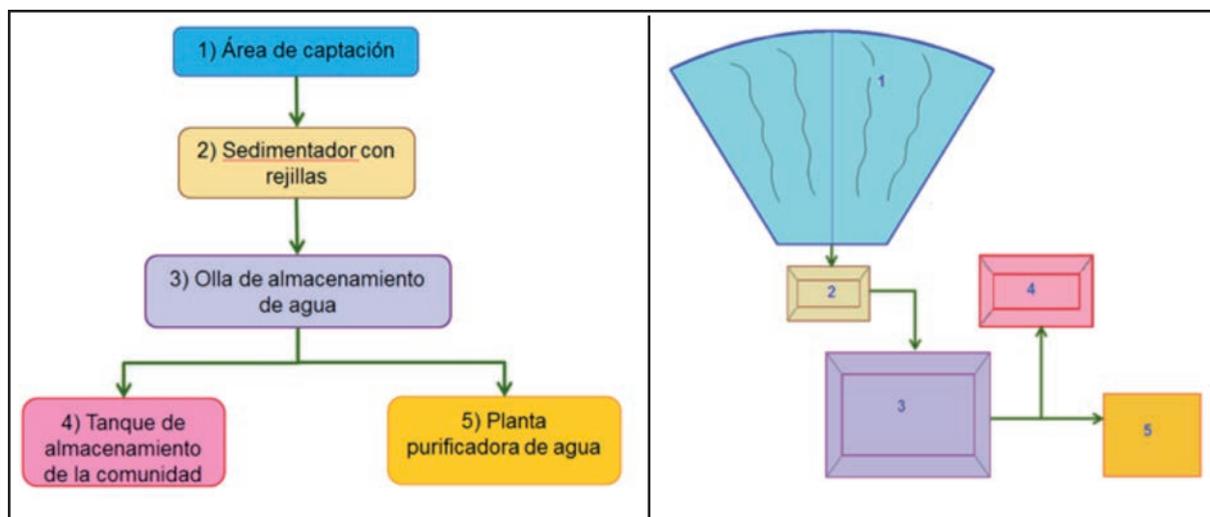


Cuando el SCALL es a nivel comunitario, se debe contar, además de los datos ya mencionados, con la siguiente información:

- Planos de localización; población, energía eléctrica, vías de comunicación (carreteras).
- Situación legal del área seleccionada.
- Superficie a construir.
- Uso del suelo y actividades que se desarrollan en las colindancias del predio.
- Estudios de geotecnia, topografía y mecánica de suelos.
- Volumen del movimiento de tierras.
- Disponibilidad de materiales y mano de obra.
- Diseño del área de captación y sedimentador.

El esquema del SCALL comunitario tiene dos variantes dependiendo del área de captación y del tipo de almacenamiento (Figura 61):

- a) Área de captación: Techumbres de espacios públicos o terreno natural impermeabilizado.
- b) Almacenamiento: Cisterna tipo capuchina u ollas con cubierta flotante.



**Figura 61.** Esquema del SCALL comunitario.

Dependiendo de las características específicas del proyecto, se puede incluir o no el tanque de almacenamiento de la comunidad (4) y la planta purificadora (5). En este caso, el agua almacenada se distribuirá directamente a los usuarios.

### ***Techumbres de espacios públicos***

En este caso el volumen a almacenar depende del área de techo disponible. El techo y la conducción deberán tener las siguientes características (Figura 62):

- a) Material del techo inerte, evitar superficies naturales como la paja, láminas de cartón a o madera recubiertas con emulsión asfáltica, láminas de asbesto.
- b) Trampa de sólidos.
- c) Diseño de las canaletas y tubería de conducción.



Sistema de captación y recolección (cancha de básquetbol), Napizaco, Erongavillaco, Mich.  
Primaria Cuauhtémoc. San Jerónimo Purenchécuaro

**Figura 62.** Área de captación aprovechando espacios públicos.

### ***Terreno natural impermeabilizado***

Otra alternativa viable para incrementar el volumen de agua en las comunidades con un costo de mantenimiento y operación reducido, es la recolección del agua de lluvia en superficies naturales impermeabilizadas. Estas permiten preservar la calidad del agua, utilizando materiales geosintéticos conocidos como “geomembranas”. Las geomembranas combinan características de resistencia, flexibilidad y estanqueidad que les permiten trabajar bajo esfuerzos tales como elongación y punzamiento. Químicamente, es un material inerte y no libera contaminantes al agua, con lo que se conserva la calidad del agua almacenada. Para seleccionar la superficie adecuada, se debe considerar:

- ✓ Tipo suelo
- ✓ Características de la geomembrana
- ✓ Pendiente
- ✓ Diseño del sedimentador con rejillas

Para la construcción, se debe realizar un levantamiento topográfico para analizar la situación y obtener un diseño conforme a las pendientes del terreno; se lleva a cabo la limpieza, nivelación, impermeabilización y finalmente se coloca la cerca perimetral como protección (Figura 63).



Trazo del área de captación.



Retiro de capa vegetal y nivelación del terreno



Delimitación/protección del área de captación.



Formación de sedimentador.



Formación de mamparas.



Impermeabilización del área de captación con geomembrana de PVC 1,0 mm.



**Figura 63.** Construcción del área de captación en terreno natural.

En este caso, para retener los sólidos, se requiere una estructura que separe los de mayor tamaño, disminuya la velocidad del agua proveniente del área de captación y permita la separación de los sólidos más pequeños (arenas, partículas de suelo). Para estas funciones se instala un sedimentador que consta de dos rejillas con aberturas de 3 y 5 cm, mamparas o deflectores y un filtro con piedra de 3 a 5 cm de diámetro como protección final a la tubería de salida hacia el almacenamiento.

#### 6.2.4.2. Almacenamiento.

##### *Cisterna tipo capuchina*

La cisterna tipo capuchina es una tecnología apropiada para almacenar agua en cantidad y calidad suficiente, para satisfacer las necesidades básicas de agua en una vivienda rural. Consiste en una estructura cilíndrica de tabique colocado tipo capuchino (de canto), reforzada con malla electro-soldada en la que se pueden almacenar hasta 1.000 m<sup>3</sup> de agua (IMTA, 2003-2014) y su tiempo de vida útil es de 25 a 30 años.

Las dimensiones varían de acuerdo a la precipitación de la zona, las áreas de captación disponibles, la topografía del lugar, el tipo de terreno y disponibilidad de espacio (Tabla 11). Los volúmenes y respectivas dimensiones que comúnmente transfiere el IMTA son los siguientes:

**Tabla 11.** Volúmenes y dimensiones de cisterna tipo capuchina.

El proceso general de construcción es el siguiente (IMTA, 2003-2014):

Aplicación	Cisterna (m <sup>3</sup> )	Diámetro (m)	Altura (m)
Vivienda	11	2.96	2.40
	20	3.80	2.40
	35	4.50	2.40
	50	5.40	2.40
Comunitario	100	8.00	2.40
	500	19.00	2.40
	1000	19.00	4.80

- a) Armado de la estructura de acero con la malla electro-soldada 6666.
- b) Colado del firme con concreto
- c) Desplante del muro capuchino
- d) Colocación de tres cinturones de seguridad utilizando varilla de ½" (en volúmenes mayores a 20 m3).
- e) Aplicación de cemento en capas de aplanado interior y exterior de una manera uniforme
- f) Se cimbra la parte superior de la cisterna y se cuela la losa con concreto con un espesor de 5 cm

Los materiales requeridos para la construcción deben conseguirse localmente, considerando su transportación y distribución a las viviendas (Tabla 12).

**Tabla 12.** Materiales para la construcción de cisternas tipo capuchina.

Materiales	
Ladrillo (12x22x5)	Malla electrosoldada N° 10
Cemento	Tapa p/cisterna 60x40 cm
Grava	Tubo PVC sanitario 4" y 2" diám.
Arena	Rafia de plástico
Alambre recocido	Arpilla o hule grueso negro de 2,5 m de ancho.
Varilla de 3/8"	Color rojo óxido

El proceso constructivo para los diferentes volúmenes de almacenamiento de la cisterna tipo capuchina, es similar en el armado del cilindro, piso y techo. Así, conforme se incrementa el volumen de almacenamiento, es necesario incorporar elementos para reforzar la estructura. En la figura 64 se describe el proceso constructivo para la cisterna de 11 m3, que incluye el procedimiento general. En las figuras 65 y 66 se describen los elementos adicionales correspondientes a las cisternas de 20 y 50 m<sup>3</sup>.



Preparación de terreno y armado de estructura.



Colado del piso, instalación de válvula de salida.



Colocación de muro con el tabique de canto (capuchino).



**Figura 64.** Proceso constructivo de cisterna tipo capuchina de 11 m<sup>3</sup>.



**Figura 65.** Proceso constructivo de cisterna tipo capuchino de 20 m<sup>3</sup>.



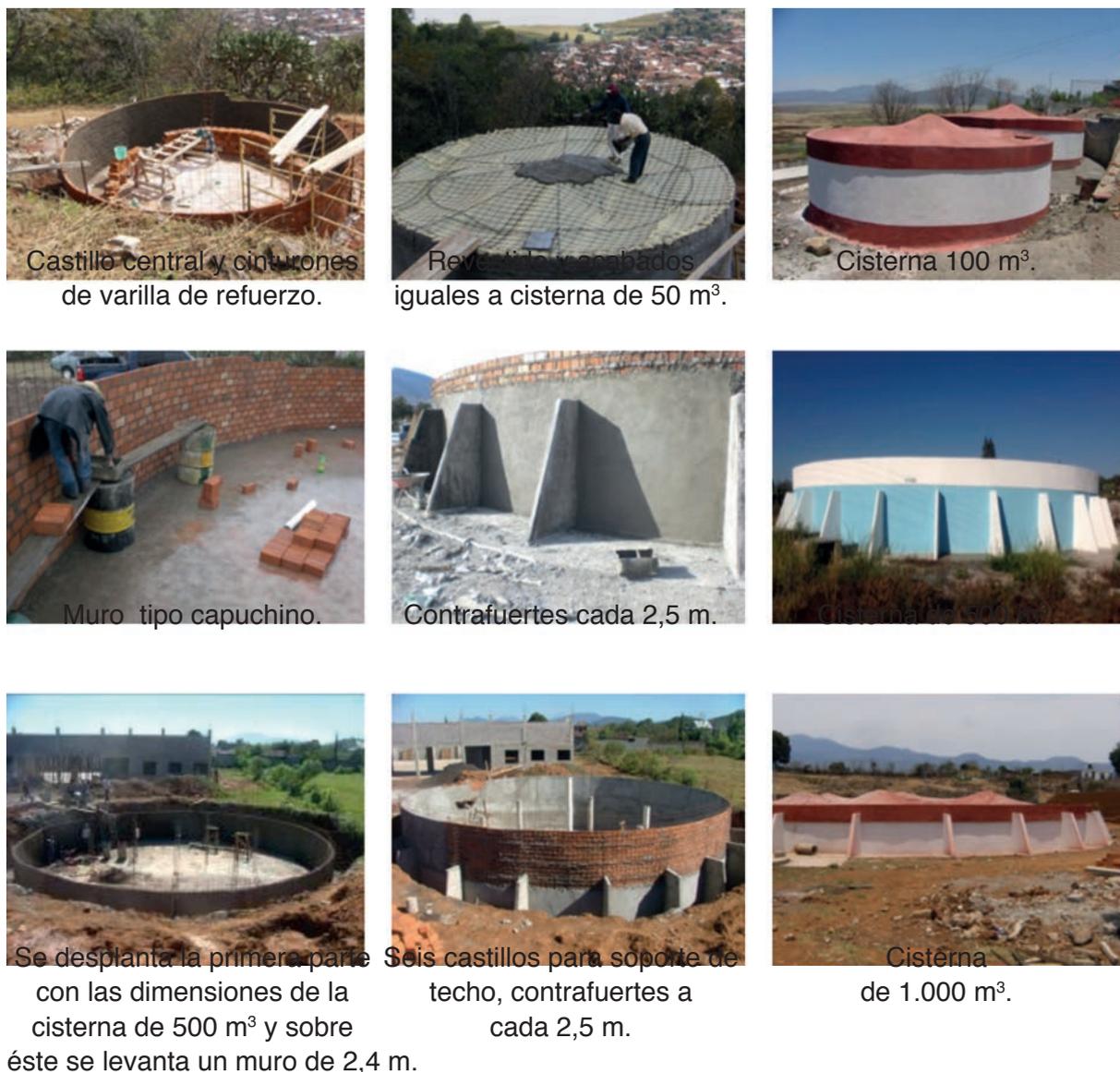
**Figura 66.** Proceso constructivo de cisterna tipo capuchino de 50 m<sup>3</sup>.

Para la construcción en volúmenes de 100, 500 y 1.000 m<sup>3</sup>, los materiales son los mismos que para la cisterna de 50 m<sup>3</sup>, a excepción de lo siguiente:

**Tabla13.** Materiales para la construcción de cisternas tipo capuchina.

Concepto
Malla electrosoldada 6.6.6.6
Varilla de 3/8'
5 Castillos 20x20
Tapa Metálica Triangular de 88x88x 120 cm

La variante en el proceso constructivo para volúmenes de 500 y 1.000 m<sup>3</sup>, es la instalación de cinco castillos centrales (columnas de concreto), para reforzar la estructura de techo y los contrafuertes colocados a una distancia de 2,5 m. Así se consigue con ello equilibrar las fuerzas de empuje interno (fuerza hidrostática) que se presentan con volúmenes mayores a 300 m<sup>3</sup> (Figura 67).



**Figura 67.** Proceso constructivo de cisternas tipo capuchina de 100, 500 y 1000 m<sup>3</sup>.

### ***Ollas con cubierta flotante***

Al igual que con el área de captación en terreno natural, se tiene la alternativa de instalar el modelo comunitario para almacenamiento del agua de lluvia, en excavaciones impermeabilizadas con geomembrana, techadas con cubiertas flotantes para preservar la calidad del agua.

En este tipo de SCALL, los reservorios de agua pueden ser contruidos con diferentes materiales, desde tierra compactada hasta concreto y en espacios con formas regulares e irregulares. Los materiales a utilizar deben cumplir estándares internacionales que aseguren su obtención por calandrado o extrusión a partir de resinas vírgenes, para garantizar una gran duración. Además, deben cumplir con propiedades físicas constantes, tales como las dimensiones por rollo y el espesor, y los certificados de calidad por lote que garanticen por escrito una vida útil de 10 años o más. Asimismo, debe existir personal certificado para asegurar que la instalación sea cuidadosa para evitar daños al material.

Otro aspecto importante en este modelo, como ya se mencionó, es la protección del agua

almacenada. Para esto se instalan cubiertas flotantes, también elaboradas con geomembrana de PVC, que han mostrado ser una opción tecnológica apropiada por su durabilidad, menor costo de instalación y mantenimiento. Su diseño ingenieril es específico al lugar de la instalación. Así, se colocan de tal manera que se muevan con los cambios en los niveles de agua en la olla, de modo que resisten los movimientos ocasionados por el viento y lo que es más importante, permiten recolectar la precipitación en su área superficial, para su posterior drenaje hacia el interior de la olla o hacia otro punto de almacenamiento. Con las cubiertas flotantes, además de prevenir la contaminación del agua, se evita la evaporación y es una de las pocas técnicas disponibles para cubrir grandes volúmenes de agua (Figura 68.)

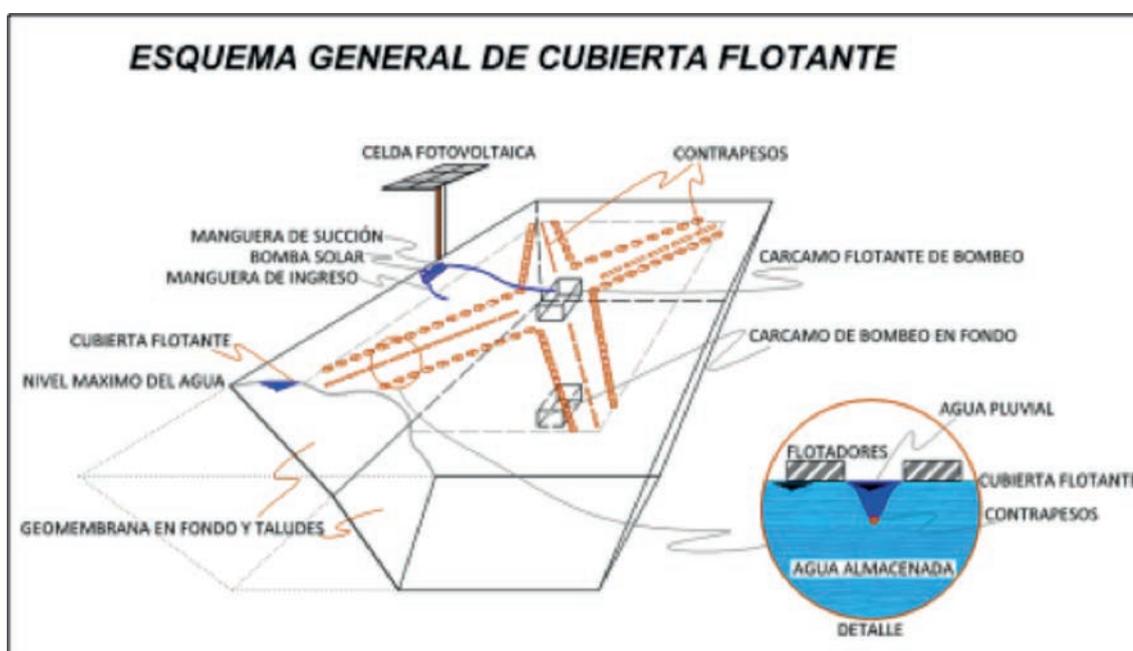


Figura 68. Esquema de las ollas con cubiertas flotantes

La olla y cubierta flotante deben considerar los siguientes elementos:

- a) Excavación compactada recubierta con A. Concreto o B. Geotextil, como medio de protección entre el impermeabilizante (Geomembrana) y el suelo compactado. Lo anterior es para evitar daños a la geomembrana por punzamiento e incrementar la resistencia al esfuerzo.
- b) Geomembrana del piso y taludes.- Es el recubrimiento que funciona como impermeabilizante entre el piso y las paredes de la olla para evitar que el agua se filtre al suelo. La geomembrana puede ser: A. Policloruro de vinilo (PVC) de 1,2 mm de espesor, o B. Polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés), 1,2mm de espesor.
- c) Cubierta flotante.- Es el techo que protegerá el agua de lluvia que se almacena en la olla. Al inicio de la temporada de lluvias, estará descansando en el fondo. Conforme llueva e ingrese el agua hacia adentro de la olla, la cubierta flotará sobre el agua y subirá de nivel hasta llegar al borde de la obra de excedencia.
- d) Flotadores.- Se colocan líneas de flotadores fabricados de poliestireno (unicel), forrados con geomembrana de PVC. Tienen la función de disminuir el peso en la cubierta para evitar daños a la geomembrana y para formar una barrera que limite el paso hacia donde se forman los canales que conducen el agua hacia el cárcamo

central.

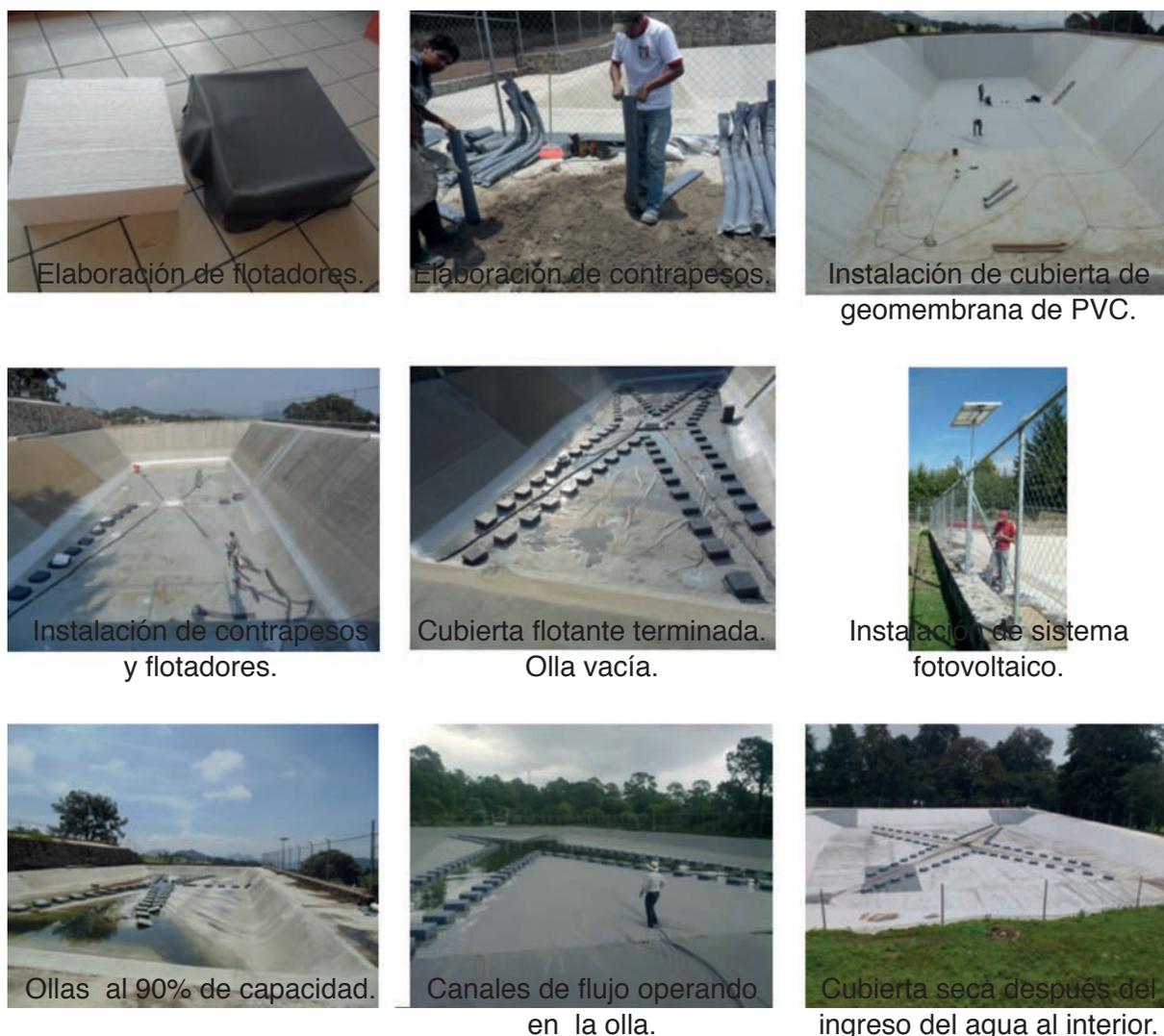
- e) Canales de conducción de agua de lluvia.- Se forman canales en la cubierta para que el agua de la lluvia se drene hacia el centro de la olla. Para esto, se colocan bolsas de geomembrana con relleno de arena de banco y a estas bolsas se les llama “contrapesos”. En estos canales, también se lleva a cabo la sedimentación de partículas.
- f) Sistema fotovoltaico.- Con la intensidad máxima de precipitación del sitio, se determina el volumen máximo que será captado en la cubierta, de tal manera que así se define la cantidad de bombas solares que se requieren instalar para introducir el agua al interior de la olla.

Ventajas de la cubierta flotante con canales y bombeo fotovoltaico:

- a) Se optimiza la captación en la cubierta flotante.
- b) Mantiene seca la cubierta y evita la contaminación del agua.
- c) Debido al flujo lento en los “canales” que se forman hacia el centro, permite que sedimenten los elementos en suspensión.
- d) Uso de energía renovable



**Figura 69.** Esquema de la instalación de ollas con cubiertas flotantes



**Figura 70.** Esquema de los flotadores para ollas con cubiertas flotantes

### 6.2.5. Resultados

Desde el año 2003 a la fecha, se ha trabajado en varios estados de la república mexicana (Figura 71), con sistemas a nivel vivienda y comunitario, en los que se promovió la transferencia de tecnologías apropiadas para el manejo integral del agua en localidades rurales e indígenas con alto grado de marginación. Con esta iniciativa se ha equipado con tecnologías sencillas y económicas, mediante un proceso de capacitación y transferencia, a familias habitantes de comunidades donde la calidad y cantidad del agua es limitada. Esto con el fin de reducir los impactos hídricos, de alimentación, salud y ambientales que padece la población rural e indígena marginada. Los resultados por volumen de cisterna/olla a nivel vivienda se resumen en la tabla 14.

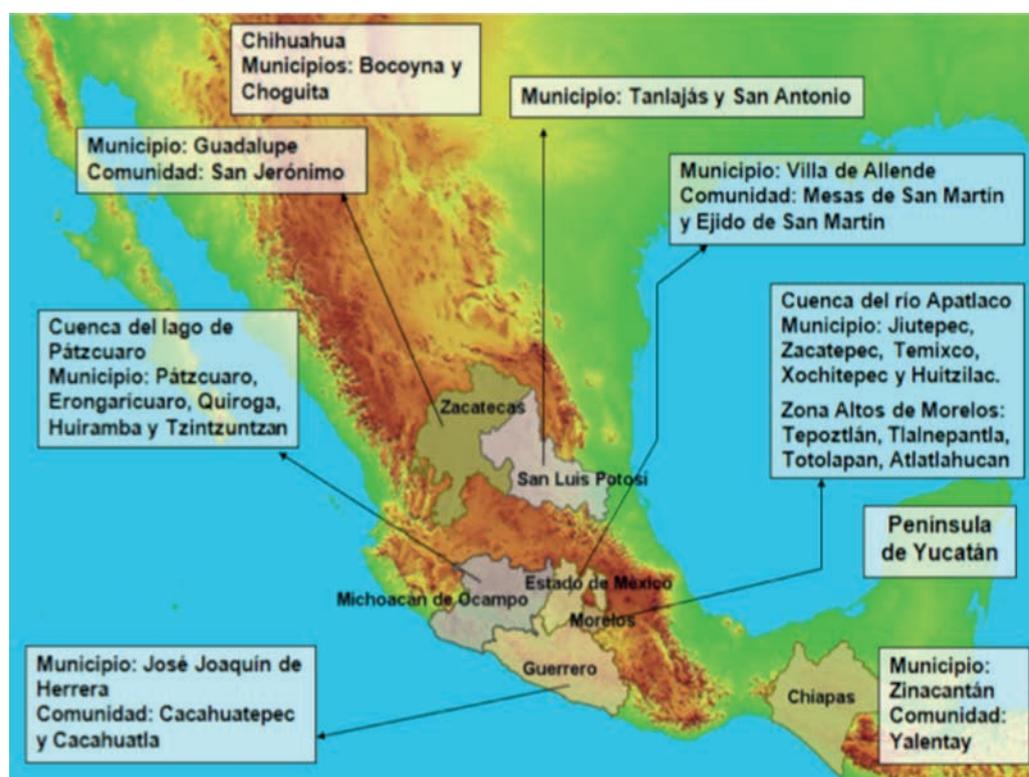


Figura 71. Regiones/estados con SCALL

Tabla 14. Capacidad instalada con SCALL a nivel vivienda.

Región	N° Cisternas					N° Total de Cisternas	Volumen total m <sup>3</sup>
	5 (m <sup>3</sup> )	11 (m <sup>3</sup> )	15 (m <sup>3</sup> )	20-35 (m <sup>3</sup> )	50 (m <sup>3</sup> )		
Cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán	305	641	12	2	1	961	8.846
Zinacantán, Chiapas	-	10	-	-	-	10	110
Guadalupe, Zacatecas	-	10	-	-	-	10	110
Cuenca del río Apatlaco y Altos de Morelos	-	-	-	468	127	595	15.710
Cacahuatpec Guerrero	-	-	-	-	28	28	1.400
Villa de Allende, Estado de México	-	-	-	15	-	15	300
La Huasteca, San Luis Potosí	-	235	-	1	31	267	4.155
Península de Yucatán	-	-	-	24	-	24	840
<b>TOTAL:</b>	<b>305</b>	<b>896</b>	<b>12</b>	<b>510</b>	<b>187</b>	<b>1.910</b>	<b>31.471</b>



**Figura 72.** Ejemplos de cisternas instaladas a nivel vivienda.

En cuanto a los SCALL comunitarios, se trabajó bajo diferentes enfoques y usuarios finales:

- Espacios públicos para dotar de agua a la comunidad en general.
- Invernaderos.
- Escuelas.
- Rehabilitación de infraestructura existente, particularmente ollas con geomembrana.
- Sistemas nuevos con área de captación en terreno natural impermeabilizado y olla con cubierta flotante.

En la tabla 15 se resumen los sistemas instalados.

**Tabla 15.** Capacidad instalada con SCALL a nivel comunitario.

Región	N° de Cisternas (m <sup>3</sup> )						N° de ollas rehabilitadas (m <sup>3</sup> )				Ollas Nuevas (m <sup>3</sup> )		Volumen total m <sup>3</sup>
	11	20	50	100	500	1.000	500-1.000	1.001-2.000	2.001-5.000	5.001-10.000	2.800	20.000	
Cuenca del lago de Pátzcuaro, y Cherán, Michoacán	-	1	2	13	1	1	-	-	-	-	-	-	2.920
Choguita, Bocoyna Chihuahua	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	61
Cuenca del río Apatlaco y Altos de Morelos	-	-	-	-	-	-	1	4	2	3	1	1	53.527
Cacahuatpec Guerrero	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50
Zacatecas, Zacatecas	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	1.000
<b>TOTAL:</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>57.558</b>

En las comunidades de estudio, históricamente se utiliza la captación de agua de lluvia y

se almacena en “ollas”, que son reservorios a cielo abierto que pueden estar recubiertos de concreto y/o geomembranas. Sin embargo, a pesar de la escasez del recurso, la falta de organización y de recursos económicos provocó el abandono de la infraestructura comunitaria, que a través de los años se deterioró hasta tal punto que la población utilizaba el agua solo para fines agrícolas y agropecuarios. Esto generó la dependencia de la compra de agua en pipa, con el impacto a la economía que provoca esta situación. Adicionalmente, la contaminación de esta fuente de abastecimiento era causa de enfermedades gastrointestinales, por lo que garantizar la calidad del agua en dichos sistemas era prioritario.



Napízaro, Erongarícuaro,  
Michoacán 100.000 litros



San Francisco Oncho,  
Michoacán 1.000.000 litros



Potabilización de agua para  
consumo humano.  
Capacidad: 150 garrafones/día



Primaria Cuauhtémoc.  
Cisterna de 100.000 litros.  
San Jerónimo Purenchécuaro



Primaria Miguel Hidalgo.  
Cisterna de 100.000 litros.  
San Andrés Tzirondaro.



Preescolar Silvestre Revueltas.  
Cisterna de 50.000 litros.  
San Jerónimo Purenchécuaro.

**Figura 73.** Ejemplos de cisternas instaladas a nivel escuela.

En la región de los Altos de Morelos, se llevó a cabo la rehabilitación de diez ollas para recuperar su capacidad de almacenamiento, además de implementarles la cubierta flotante (Figura 74). Se realizó el diagnóstico técnico del estado de la geomembrana existente, perímetro y andadores. Se diseñó la cubierta flotante con el arreglo de los flotadores, contrapesos y cárcamo de drenado con bombeo solar acorde a la geometría de cada olla. Se capacitó a los operadores de las ollas y se entregaron los manuales de operación y mantenimiento. Con estas acciones se recuperó una capacidad total de almacenamiento de 30.727 m<sup>3</sup>.

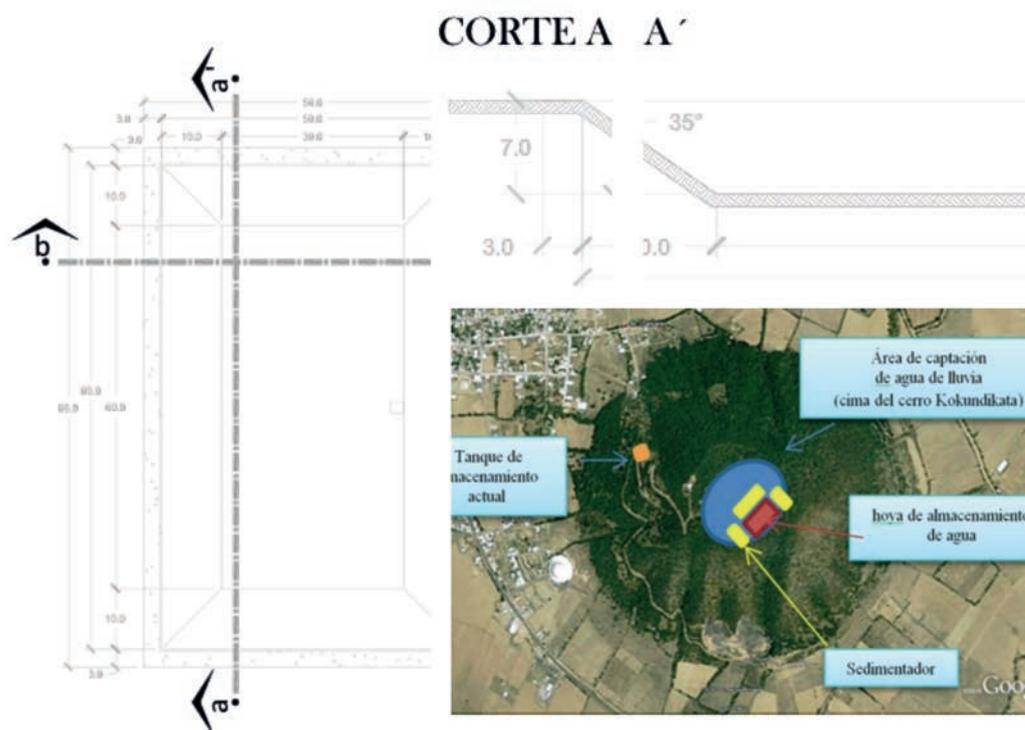
Particularmente en la localidad de Felipe Neri, además de la rehabilitación de cuatro ollas, se diseñó e implementó un modelo comunitario de 2.800 m<sup>3</sup>, un sistema de distribución del agua de lluvia almacenada en cinco ollas y una planta potabilizadora para la producción de agua para consumo humano.

Localidad/volumen	Antes de la rehabilitación-techado	Ollas rehabilitadas-techadas
Coajomulco Centro V= 2.790 m <sup>3</sup>		
Felipe Neri V= 2.800 m <sup>3</sup>		
Manuales de operación, uno para cada localidad de tal manera que sean adaptados al sitio.		

**Figura 74.** Ejemplo de dos ollas rehabilitadas y techadas con cubiertas flotantes, manuales de operación y mantenimiento.

El modelo SCALL comunitario más grande hasta la fecha en México (20.000 m<sup>3</sup>) se instaló en la localidad de Cherán, del estado de Michoacán, que es una localidad indígena autogobernada desde 2011. Tiene una población de 14.245 habitantes (INEGI 2010) y una problemática cada vez más aguda por el abatimiento del acuífero aunado a los altos costo de operación y mantenimiento del sistema de distribución de agua.

Se planteó la instalación del sistema SCALL en el cerro “Kokundicata” para aprovechar la elevación del mismo y formar como área de captación el cráter del cerro. Se realizaron los estudios topográficos y, por las características inestables del suelo, se hizo un estudio geoelectrico en el área de estudio. Para lograrlo se colocaron 2 líneas de tomografía eléctrica, por medio de las que se indujo una corriente eléctrica en el terreno, y así se midieron las caídas del potencial en el mismo y se calcularon las resistividades aparentes del terreno. Luego de este estudio, fue necesario definir las propiedades índice y mecánicas del suelo, para lo que se tomaron muestras inalteradas. A partir de los resultados obtenidos, se determinó como opción viable el acomodo que se muestra en la Figura 75. Esto debido a los riesgos de falla en los taludes por la carga que recibiría el suelo con la olla ubicada en las laderas del cerro.



**Figura 75.** Diseño y arreglo del SCALL en Cherán, Michoacán.

Una vez definida el área para instalar el sistema, se calcularon, con la metodología antes descrita, las dimensiones de la infraestructura a partir de la precipitación media aprovechable, para lo que se contaron con datos en la zona de estaciones con registros de 1982 a 2003, y se consideraron solamente las precipitaciones mayores a 20 mm diarios. De lo anterior resultó en una media anual factible de captarse y aprovecharse de 981 mm. Las dimensiones de los componentes del sistema quedaron de la siguiente manera (Figura 76):

- a) Área de Captación = 20.000 metros cuadrados
- b) Volumen de olla = 19.620 metros cúbicos
- c) Dimensiones de olla = 80 x 50 x 7 metros, con talud  $k=1,43$

Los beneficios del SCALL contemplan que el agua de lluvia captada se someterá a tratamiento para su posterior envase y comercialización en la localidad. Adicionalmente, con la venta del agua envasada, la comunidad podrá contar con ingresos suficientes para cubrir los gastos de operación y mantenimiento del sistema SCALL, así como los gastos de energía eléctrica de los equipos de bombeo.



**Figura 76.** Instalación del SCALL en Cherán, Michoacán.

### 6.2.6. Conclusiones

La cantidad de agua utilizada en los hogares tiene una gran influencia en la salud. Las personas tienen una necesidad fisiológica básica del agua, para mantener la hidratación adecuada. Además se necesita agua para la preparación de alimentos así como para mantener la higiene, que es indispensable para la salud. Por tanto, el diseño e implementación de SCALL y la rehabilitación de las ollas, así como la instalación de sistemas nuevos, permitirán a la población contar con una dotación de aproximadamente 45 l/persona día. Esta se encuentra dentro del rango recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para cubrir las necesidades de higiene, preparación de alimentos, hidratación y lavado de ropa dentro del hogar. Finalmente, con estos proyectos, se ha contribuido a través del IMTA, en el beneficio a una población estimada en este caso de 42.496 habitantes con sistemas domiciliarios y a 18.629 habitantes en sistemas de nivel comunitario de captación pluvial.

#### **6.2.7. Agradecimientos.**

Los autores agradecen a la Comisión Nacional del Agua, la comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos, y a la Fundación Gonzalo Río Arronte IAP, por haber facilitado los recursos para la implementación de los sistemas.

## VI BIBLIOGRAFÍA

- Ballén S., J.A., Galarza G., M.A., and Ortiz M. 2006. Sistemas de Aprovechamiento de Agua Lluvia para Vivienda Urbana. VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua.
- 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.
- Chow, V. 1998. Hidrología aplicada. Fundamentos de hidrología de superficie. Bogotá. Editorial McGraw-Hill. 583 p.
- CONAMA, 2004. Guía relativa al desarrollo de la dictación de Normas Secundarias de Calidad Ambiental para Aguas Continentales Superficiales y Aguas Marinas NSCA.
- Córdova, M. ;(2007). Tecnologías apropiadas en materia de agua en comunidades rurales periurbanas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Córdova, M. ;(2007). Desarrollo, evaluación, difusión y transferencia de tecnologías apropiadas en materia de agua para comunidades rurales y periurbanas marginadas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Córdova, M. ;(2009).Tecnologías apropiadas en materia de agua para comunidades rurales marginadas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Cromell C, Miller J, Bradley LK. 2003. Earth-Friendly Desert Gardening. Phoenix, AZ: Arizona Master Gardener Press. 136 p.
- Cruz, T. A.; Rivero, B. M.; (2007). Aplicación de tecnologías apropiadas en materia de agua para comunidades rurales: segunda etapa. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Cruz, T. A.; Rivero, B. M.; Córdova, R. M. ;(2007). Transferencia de tecnologías apropiadas en el municipio de Huiramba. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Cruz, T. A.; Rivero, B. M.; Córdova, R. M. ;(2007). Transferencia de tecnologías apropiadas en el municipio de Pátzcuaro. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.

- Cruz, T. A.; Rivero, B. M.; Córdova, R. M. ;(2007). Transferencia de tecnologías apropiadas en el municipio de Quiroga. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Dhillon, R.S. and G. von Wuehisch. 2013. Mitigation of global warming through renewable biomass. *Biomass and Bioenergy* 48: 75-89.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2012. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025. 40 p.
- Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). 2013. Balance de Gestión Integral. Disponible en: <http://www.doh.gov.cl/gestion/bgi/Paginas/default.aspx>
- 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.
- Flexible-Membrane Covers and Linings for Potable-Water Reservoirs. (2000). American Water Works Association. Manual of Water Supply Practices M25. Tercera edición. ISBN 1-58321-070-9. Denver, USA.
- Foro Mundial del Agua. 2006. Documento Temático, eje temático 3. Agua y saneamiento para todos, ciudad de México, 141pp.
- Foster, H. 1988. Theoretical frequency curves and their application to engineering problems. *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.* 87 (2) 142-173.
- García. V. N.; Martín, D.A.; Nava, A. A.; Gómez, L. L. ;(2005). Tecnologías apropiadas en materia de agua para comunidades rurales: cuenca del lago de Pátzcuaro. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Tecnología Hidráulica.
- Garcia-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.
- Garcia-Chevesich, P. 2014. Control de la erosión y recuperación de suelos degradados. Outskirts Press. Denver, CO. 407 p.

- Garcia-Chevesich, P. 2008. Procesos y control de la erosión. Outskirts Press. Denver, CO. 274 p.
- Garcia-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.
- Garcia-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.
- Guajardo, P. B.; Ponce, S. H. ;(2010). Transferencia de tecnologías apropiadas en materia de agua en comunidades rurales de la Región Huasteca en San Luis Potosí. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Guajardo, P. B.; Ponce, S. H. ;(2011). Transferencia de tecnologías apropiadas en materia de agua en comunidades rurales con rezago social en San Luis Potosí: Tercera Etapa. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Guerrero, T.; Rives, C.; Rodríguez, A.; Saldívar, Y.; Cervantes, V. 2009. El agua en la ciudad de México Ciencias, Núm. 94, abril-junio, pp. 16-23 Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Guías para la calidad del agua potable. (2006). Organización Mundial de la Salud. Primer apéndice a la tercera edición. Volumen 1. ISBN 92 4 154696 4. Versión electrónica disponible en [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/dwq/gdwq3\\_es\\_full\\_lowres.pdf](http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf).
- 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.
- Instituto Nacional de Estadísticas (INE). 2002. Censo de población y Vivienda. Disponible en: [http://www.ine.cl/canales/chile\\_estadistico/familias/censos.php](http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/censos.php)
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua;(2006). Estudio y propuesta de transferencia de paquetes integrales de tecnologías apropiadas en la Península de Yucatán. IMTA. Coordinación de Hidráulica.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua;(2006). Seguimiento de la capacitación para la implementación de tecnologías apropiadas en los municipios de Erongarícuaro, Pátzcuaro, Tzintzuntzan, Quiroga y Huiramba, en el estado de Michoacán. IMTA. Coordinación de Hidráulica.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2007. Ingeniería hidráulica en México: Ciencia y tecnología del agua.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua;(2009). Transferencia de tecnologías apropiadas en materia de agua en las comunidades de Cacahuatpec y Cacahuatla, municipio José Joaquín de Herrera, Guerrero: primera etapa. IMTA. Coordinación de Tecnología Hidráulica.
- 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.
- Jackson, R. B. *et al.* 2011. Water in a changing world. *Ecol. Appl.* 11: 1027-1045.
- 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.
- MacAdam, J. 2010. Green Infrastructure for Southwestern Neighborhoods. Watershed Management Group. 47 p.
- Manual del Agua; Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones (1993). Nalco Chemical Company 7: 1-33.
- Meltzer, D. J. 1999. Human responses to Middle Holocene (Altithermal) climates on the North American Great Plains. *Quat. Res.* 52: 404-416.

- 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.
- 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.
- Postel, S. L., Daily, G. C. and Ehrlich, P. R. 1996. Human appropriation of renewable fresh water. *Science* 271: 785-788.
- Rivero, B. M.; Córdova, R. M. ;(2011). *Transferencia de tecnologías apropiadas en comunidades rurales en la cuenca del lago de Pátzcuaro*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Rivero, B. M.; Guajardo, P. B.; Córdova, R. M. ;(2008). *Seguimiento al proceso de apropiación de tecnologías apropiadas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Rohde, R.A. and R.A. Muller. 2005. Cycles in fossil diversity. *Nature* 434: 208-210.
- Salinas, A.; Rodriguez, R.; Morales, D. 2010. *Manual de especificaciones técnicas básicas para la elaboración de estructuras de captación de agua de lluvia (SCALL) en el sector agropecuario de Costa Rica y recomendaciones para su utilización*. Nicoya: Universidad Nacional, CEMEDE. 96 p.
- 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.
- 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](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 “Lluviatl” en México. Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo, pp. 39-57.
- Pizarro, R.; Novoa, P. 1986. Elementos técnicos de Hidrología I. Instructivos técnicos. La Serena, Chile. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. 57 p.
- Pizarro R., Sangüesa, C.; Flores, J.; Martínez, E. 2004. Diseño de Obras para la Conservación de Aguas y Suelos. CORFO 2004.
- Ruskin, R. 2001. Almacenaje de agua en cisternas 1a Parte: idea antigua para un mundo moderno. Revista Agua Latinoamérica. Julio/agosto. 13-16.
- UNESCO, 2013. Curvas Intensidad Duración Frecuencia para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°29.
- Universidad Autónoma de Zacatecas ;(2006). Transferencia de tecnologías apropiadas en materia de agua en los municipios de Quiroga, Erongarícuaro, Tzintzuntzan, Huiramba y Pátzcuaro. UAZ. Unidad académica de Ingeniería.
- Vázquez, S.; (2012). Rehabilitación y construcción de infraestructura para el almacenamiento de agua de lluvia y transferencia de tecnologías apropiadas en comunidades de los Altos de Morelos, a través del Programa para la Construcción y Rehabilitación de Sistemas de Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales (PROSSAPYS), a ejecutarse en los municipios de Tlalnepantla, Atlatlahucan y Totolapan. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- Villegas, D. ;(2007). Implementación de un área demostrativa de tecnologías apropiadas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Hidráulica.
- XII Conference International Rainwater Catchments Systems Association (IRCSA). 2005. Nueva Delhi. [www.ircsa.org](http://www.ircsa.org) y [www.irha-h2o.org](http://www.irha-h2o.org)

## VIII ANEXOS

## 8.1.

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	4,262142

Fuente: Pizarro *et al.* (1988)

## 8.2.

**Tabla A2.** Valores de la Función Gama.

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

## 8.3.

**Tabla A3.** Valores de la Función Chi cuadrada, con n grados de libertad.

df	0,995	0,99	0,975	0,95	0,90	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
1	---	---	0,001	0,004	0,016	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	9,236	11,070	12,833	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,646	2,180	2,733	3,490	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,042	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	7,790	21,064	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	8,547	22,307	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	9,312	23,542	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,697	6,408	7,564	8,672	10,085	24,769	27,587	30,191	33,409	35,718
18	6,265	7,015	8,231	9,390	10,865	25,989	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,844	7,633	8,907	10,117	11,651	27,204	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,434	8,260	9,591	10,851	12,443	28,412	31,410	34,170	37,566	39,997
21	8,034	8,897	10,283	11,591	13,240	29,615	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,643	9,542	10,982	12,338	14,041	30,813	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,260	10,196	11,689	13,091	14,848	32,007	35,172	38,076	41,638	44,181
24	9,886	10,856	12,401	13,848	15,659	33,196	36,415	39,364	42,980	45,559
25	10,520	11,524	13,120	14,611	16,473	34,382	37,652	40,646	44,314	46,928
26	11,160	12,198	13,844	15,379	17,292	35,563	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,879	14,573	16,151	18,114	36,741	40,113	43,195	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	18,939	37,916	41,337	44,461	48,278	50,993
29	13,121	14,256	16,047	17,708	19,768	39,087	42,557	45,722	49,588	52,336
30	13,787	14,953	16,791	18,493	20,599	40,256	43,773	46,979	50,892	53,672
40	20,707	22,164	24,433	26,509	29,051	51,805	55,758	59,342	63,691	66,766
50	27,991	29,707	32,357	34,764	37,689	63,167	67,505	71,420	76,154	79,490
60	35,534	37,485	40,482	43,188	46,459	74,397	79,082	83,298	88,379	91,952
70	43,275	45,442	48,758	51,739	55,329	85,527	90,531	95,023	100,425	104,215
80	51,172	53,540	57,153	60,391	64,278	96,578	101,879	106,629	112,329	116,321
90	59,196	61,754	65,647	69,126	73,291	107,565	113,145	118,136	124,116	128,299
100	67,328	70,065	74,222	77,929	82,358	118,498	124,342	129,5		

## 8.4.

**Tabla A4.** Distribución del estadístico de Kolmogorov-Smirnov (Dt).

n/a	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	n/a	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,900	0,950	0,975	0,990	0,995	21	0,226	0,259	0,287	0,321	0,344
2	0,684	0,776	0,842	0,900	0,929	22	0,221	0,253	0,281	0,314	0,337
3	0,565	0,636	0,780	0,785	0,829	23	0,216	0,247	0,275	0,307	0,330
4	0,493	0,565	0,624	0,689	0,734	24	0,212	0,242	0,269	0,301	0,323
5	0,447	0,509	0,563	0,627	0,669	25	0,208	0,238	0,264	0,295	0,317
6	0,410	0,468	0,519	0,577	0,617	26	0,204	0,233	0,259	0,290	0,311
7	0,381	0,436	0,483	0,538	0,576	27	0,200	0,229	0,254	0,284	0,305
8	0,358	0,410	0,454	0,507	0,542	28	0,197	0,225	0,250	0,279	0,300
9	0,339	0,387	0,430	0,480	0,513	29	0,193	0,221	0,246	0,275	0,295
10	0,323	0,369	0,409	0,457	0,489	30	0,190	0,218	0,242	0,270	0,290
11	0,308	0,352	0,391	0,437	0,468	31	0,187	0,214	0,238	0,266	0,285
12	0,296	0,338	0,375	0,419	0,449	32	0,184	0,211	0,234	0,262	0,281
13	0,285	0,325	0,361	0,404	0,432	33	0,182	0,208	0,231	0,258	0,277
14	0,275	0,314	0,349	0,390	0,418	34	0,179	0,205	0,227	0,254	0,27
15	0,266	0,304	0,338	0,377	0,404	35	0,177	0,202	0,224	0,251	0,269
16	0,258	0,295	0,327	0,366	0,392	36	0,174	0,199	0,221	0,247	0,265
17	0,250	0,286	0,318	0,355	0,381	37	0,172	0,196	0,218	0,244	0,262
18	0,244	0,279	0,309	0,346	0,371	38	0,170	0,194	0,215	0,241	0,258
19	0,237	0,271	0,301	0,337	0,361	39	0,168	0,191	0,213	0,238	0,255
20	0,232	0,265	0,294	0,329	0,352	40	0,165	0,189	0,210	0,235	0,252
						>40	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,52}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

# Manual de diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile



Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura



Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe

Programa Hidrológico Internacional



UNESCO  
Programa Hidrológico Internacional  
Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe  
Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso  
Casilla de Correo 859  
11200 Montevideo, Uruguay  
Tel.: (598) 2413 20 75, Fax: (598) 2413 20 94  
phi@unesco.org.uy  
<http://www.unesco.org.uy/phi>

Facultad de Ciencias Forestales  
Universidad de Talca  
Avenida Lircay S/N  
Talca, Chile  
Tel.: 56 71 2200 370 / 2200 375  
<http://www.cienciasforestales.cl>  
<http://ctha.otalca.cl>

