



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



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Aqua-LAC

Miembro del Programa Hidrológico Intergubernamental
para América Latina y el Caribe

Diseño eficiente de Sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales para su aplicación en zonas con demandas crecientes

Efficient design of rainwater harvesting systems in rural areas for application in areas with increasing demands

Claudia Sangüesa Pool^{1*}, Carlos Vallejos Carrera²

Recibido: 29/09/2021

Aceptado: 09/11/2021

*Autor de correspondencia

Resumen

Los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) son sistemas que permiten la captura y almacenamiento de las aguas lluvia durante la época lluviosa para su uso posterior, ya sea para riego, para los animales, para combatir incendios, para consumo doméstico e incluso como agua potable. En el actual escenario de incertidumbre climática reflejada en una mega-sequía que afecta a la zona central de Chile surge la necesidad de buscar nuevas fuentes de agua. Por ello, se planteó el estudio de los SCALL en distintas zonas del país, con el objetivo de determinar estándares de diseño y construcción que permitan satisfacer las demandas crecientes de agua en zonas rurales. En este documento se presentan los resultados obtenidos para las regiones de Valparaíso y del Maule en distintos estudios iniciados en el año 2012. Como resultado se determinó que el uso de la precipitación anual ajustada a la función de distribución de probabilidad de Gumbel con una probabilidad de excedencia del 0.9 fue adecuada para el diseño de las obras. A la vez, se determinó que los mejores materiales son el uso de geomembrana en el área de captación y el uso de estanque flexible como hidroacumulador, y ello considerando la facilidad en la instalación, se mantiene la calidad del agua y presenta la mejor relación costo/beneficio en términos hidrológicos y económicos. Así se recomienda el uso de estos sistemas para subsanar la escasez de agua para familias rurales con fines de uso doméstico y agrícola.

Palabras clave: Captación de aguas lluvias, distribución de probabilidad, Gumbel, Hidroacumulador, Precipitación de diseño

Abstract

Rainwater harvesting systems (SCALL) are systems that allow the capture and storage of rainwater during the rainy season for later use, either for irrigation, for animals, to fight fires, for domestic consumption and even as drinking water. In the current scenario of climatic uncertainty reflected in a mega-drought that affects the central zone of Chile, the need arises to look for new sources of water. For this reason, the study of SCALL in different areas of the country was proposed, with the aim of determining design and construction standards that allow meeting the growing demands for water in rural areas. This document presents the results obtained for the Valparaíso and Maule regions in different studies started in 2012. As a result, it was determined that the use of annual precipitation adjusted to the Gumbel probability distribution function with a probability of the 0.9 exceedance was adequate for the design of the works. At the same time, it was determined that the best materials are the use of a geomembrane in the catchment area and the use of a flexible tank as a hydroaccumulator, and this considering the ease of installation, the water quality is maintained and has the best cost/benefit ratio in hydrological and economic terms. Thus, the use of these systems is recommended to remedy the water shortage for rural families for domestic and agricultural purposes.

Keywords: Rainwater harvesting, Gumbel, probability distribution function, designer rain, Hydroaccumulator

1 Cátedra Unesco en Hidrología de Superficie, Universidad de Talca. claudiasanguesa@gmail.com

2 Independiente. cvallejoscarrera@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Desde las antiguas civilizaciones confeccionaban obras para captar el agua lluvia y luego conducirla a un estanque acumulador o directamente a obras de riego. Así, se han encontrado evidencias de obras de más de 4000 años, destinadas a la captura y uso de aguas lluvia en diversas partes del mundo, lo que permite concluir que estas obras han cumplido una función importante en actividades agrícolas y domésticas, especialmente para las regiones áridas y semiáridas del planeta. No obstante lo anterior, en Chile estas tecnologías se han comenzado a desarrollar y a publicar recientemente, y responden a la necesidad de aumentar la disponibilidad de agua durante la época estival. Y ello cobra cada vez mayor importancia dado el escenario de incertidumbre climática que se observa en la zona central del país, reflejado en una sequía que afecta al consumo humano, a las actividades productivas y al medioambiente (Valdés-Pineda et al., 2020; Sangüesa et al., 2018). En este sentido, se plantean interrogantes acerca de como diseñar y construir estos sistemas de tal forma de optimizar la oferta de agua; por ejemplo, cómo obtener la precipitación de diseño que dé seguridad en la captura de cierto volumen de agua en un territorio con una alta variabilidad en las precipitaciones. O qué materiales se pueden utilizar para obtener una mejor relación costo/beneficio. En este marco, el Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) de la Universidad de Talca comenzó a desarrollar los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) en la Región del Maule, a partir del año 2012, con financiamiento del Fondo de Innovación para la Competitividad (FIC Maule). Y posteriormente, se han desarrollado e implementado SCALL en otras

regiones del país, tales como Coquimbo, Valparaíso, Ñuble, Biobío y Los Ríos, con proyectos financiados a través de distintos fondos públicos concursables. En el primer estudio desarrollado en la Región del Maule a partir del 2012 se evaluó el diseño en base a una precipitación definida para cada sitio, y se evaluaron distintas opciones de materiales y de construcción de los SCALL (Unesco, 2015; Pizarro et al., 2016). Luego, en los proyectos posteriores se pudo evaluar el diseño en otros territorios del país y su aplicabilidad para uso agrícola (Fernández et al., 2017). Los Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) son sistemas que permiten la captura y almacenamiento de las aguas lluvia para su uso posterior, ya sea para riego, para los animales, para combatir incendios, para consumo doméstico e incluso como agua potable (García-Chevesich et al., 2015). Los SCALL están conformados por una zona de captación, un sistema de conducción y un hidroacumulador (Figura 1). La zona de captación corresponde a una zona impermeabilizada implementada sobre la ladera de un cerro. También puede utilizarse el techo de alguna construcción (casa, bodega, galpón) teniendo el cuidado de que el techo no altere la calidad del agua (por ejemplo, que no esté oxidado). Un segundo componente del SCALL está dado por el sistema de conducción, que lleva el agua capturada hacia el hidroacumulador. Se puede incluir un sistema de decantación o filtros si fuese necesario. Un tercer elemento corresponde al hidroacumulador, que es donde se almacena el agua lluvia, y para ello, existen diversas alternativas, tales como estanque australiano, de PVC, de fibra de vidrio y estanques flexibles (Unesco, 2015; Pizarro et al., 2016; Fernández et al., 2017)..

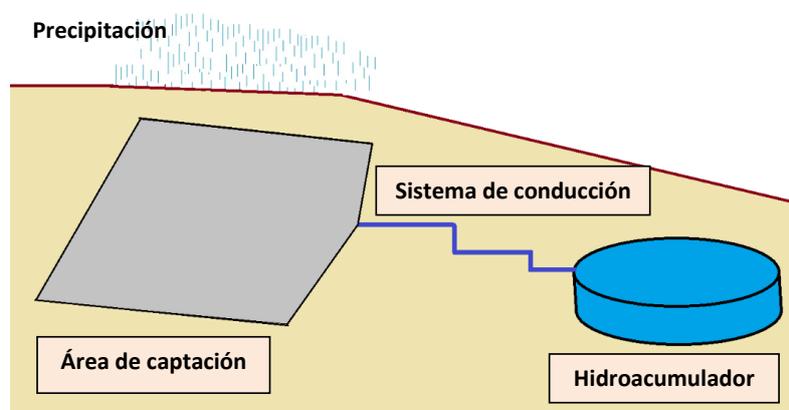


Figura 1. Representación esquemática de un Sistema de captación de aguas lluvias

En el presente artículo se muestra la metodología desarrollada e implementada por el CTHA en los distintos proyectos, para el diseño y construcción de los SCALL con el objetivo de definir un diseño eficiente y aplicable a distintas zonas del país.

2. METODOLOGÍA

En el diseño del SCALL se considera, por un lado, las características hidrológicas del sitio, con el objetivo de determinar las dimensiones del área de captación y el volumen de agua a almacenar, y por otro, los materiales a utilizar, con el fin de lograr una adecuada relación costo/beneficio. A continuación, se muestran los pasos que se siguieron para determinar los elementos que propician un diseño eficiente.

2.1 Diseño Hidrológico

Precipitación de Diseño

Selección de Estación Pluviométrica

Un primer paso en el diseño de los SCALL consiste en definir la precipitación de diseño, a partir de la cual se realizarán los cálculos para el dimensionamiento de sus partes. Para ello, se deben seleccionar estaciones pluviométricas cercanas a los sitios donde se ubicarán los sistemas. Es deseable que las estaciones posean un registro de al menos 15 años lo que permite mayor certeza en los análisis estadísticos. Esto con el fin de garantizar que el diseño de la obra esté acorde a la precipitación del

lugar. Si faltasen registros de precipitaciones mensuales y, de superar estas el 10 % del total, se recomienda utilizar el método de completación por promedios históricos (Pizarro et al., 2009).

Tratamientos estadísticos

Para cada sitio seleccionado se debe definir la precipitación de diseño la que se calcula a través de funciones de distribución de probabilidad. De esta forma se obtiene la probabilidad de excedencia la que se define como la probabilidad de que un valor de la variable aleatoria (en este caso, la precipitación anual) sea excedido. Se encuentra asociada al periodo de retorno, siendo este definido como el tiempo que transcurre entre dos eventos o sucesos de similares características.

Ajuste a función de distribución de probabilidad (FDP)

Una vez definida la estación, la serie de precipitación anual obtenida fue ajustada a una (FDP) con el fin de obtener la precipitación de diseño en términos de la probabilidad de ocurrencia asociada a un periodo de retorno. Se utilizaron diversas FDP tales como, Log Normal, Gumbel, Pearson tipo III, Goodrich y Gamma. No obstante, la experiencia desarrollada en Chile para datos anuales de precipitación señala que la FDP más adecuada es la de Gumbel por su capacidad de ajuste en distintos periodos (Pizarro et al., 2018; Pizarro y Novoa, 1986). A continuación, se detallan las FDP utilizadas.

Función de Gumbel

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

$$F(X) = e^{-e^{-d*(X-\mu)}} \quad (1)$$

donde

- x Valor de la variable aleatoria (precipitación de diseño)
- d y μ Parámetros de la función que deben ser ajustados
- e Constante de Neper

Los parámetros de la distribución de una muestra de tamaño infinito se estiman en base a la media aritmética y a la desviación estándar de la muestra, lo

que simplifica su cálculo. Estos parámetros se calculan de la siguiente forma:

$$d = \frac{1}{0.779696 * S} \quad (2)$$

$$\mu = \bar{x} - 0.450047 * S \quad (3)$$

Función de Goodrich

Esta FDP posee la característica 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 (Pizarro y Novoa, 1986). La función de distribución acumulada de Goodrich se define mediante la siguiente expresión:

$$P(x \leq X = F(X)) = 1 - e^{-\alpha(X-X_1)^{1/p}} \quad (4)$$

Para $x_1 < x \leq \infty$

donde

X Valor de la variable aleatoria
 α, p y X_1 Parámetros a estimar a partir de los valores de la muestra

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

$$\frac{m_3}{S^3} = P(p); \quad (5)$$

$$\alpha^{2p} = \frac{1}{S^2} [\Gamma(2p + 1) - \Gamma^2(p + 1)] \quad (6)$$

$$X_1 = \bar{X} - \frac{\Gamma(p + 1)}{\alpha^p} \quad (7)$$

$$m_3 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^3}{n} \quad (8)$$

donde

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

La función auxiliar de Goodrich permite estimar para este caso la expresión m^3/S^3 , a través de la cual es

posible determinar p , con ayuda de la tabla Valores de la Función $P(p)$ auxiliar de Goodrich.

Distribución Log-Normal

$$F(x) = \frac{1}{2\pi\alpha(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - a}{\beta}\right)^2} dx \quad (9)$$

Donde los parámetros se estiman en base a los logaritmos de la variable aleatoria, como se muestra a continuación:

$$a = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad (10)$$

$$\beta = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - a)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

donde

- χ Representa el valor a asumir por la variable aleatoria
- α, β Parámetros de la función a estimar
- e Constante de Neper

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

$$z = \frac{\ln x - a}{\beta} \quad (12)$$

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

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

Distribución Pearson Tipo III

$$F(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)} \left(\frac{x-\delta}{\delta}\right)^{\beta-1} dx \quad (13)$$

Los parámetros de la distribución se estiman en función de la media aritmética (\bar{x}) y la desviación

estándar (S) de la muestra, a través de las siguientes expresiones

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}} \quad (14)$$

$$\beta = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^2 \quad (15)$$

$$\delta = \bar{x} - \alpha\beta \quad (16)$$

donde

- e Constante de Neper
- α, β, δ Parámetros
- S Desviación típica
- \bar{x} Media aritmética

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^3}{n}}{S^3} \quad \text{Coeficiente de sesgo}$$

La variable estandarizada y se presenta a continuación

$$y = \frac{x - \delta}{a} \quad (17)$$

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

$$x^2 = 2y \quad (18)$$

$$\mu=2\beta \tag{19}$$

Por lo tanto, el valor que asume la variable aleatoria x a partir de lo anteriormente señalado se define como $x = ya + \delta Y$ la probabilidad es obtenida a través de los valores presentes en la tabla de percentiles de la distribución chi cuadrado con n grados de libertad.

Pruebas de bondad del ajuste

Estas pruebas tienen como objetivo evaluar la calidad del ajuste de los datos a las respectivas FDP. Existen diversas pruebas, pero en hidrología son muy utilizados el Coeficiente de Determinación R^2 y el test de Kolmogorov-Smirnov.

El test Kolmogorov-Smirnov permite verificar la hipótesis de que cierta muestra procede de una distribución particular. Para ello se debe determinar la frecuencia observada acumulada y la frecuencia teórica acumulada y obtener el valor absoluto de la máxima diferencia entre ambas, para luego utilizar la expresión de Weibull. El coeficiente de determinación R^2 , por su parte, señala la proporción de la variación total de las frecuencias observadas que es explicada por las frecuencias teóricas acumuladas (Pizarro y Novoa, 1986). Se define mediante la siguiente expresión.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(F_n(X))_i - F(X)_i)^2}{\sum(F_n(X))_i - \overline{F_n(X)}_i)^2} \tag{20}$$

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
- $\overline{F_n(X)}_i$ Media de las Frecuencias observadas acumuladas

Determinación de la precipitación de diseño

Con la FDP ajustada y validada se determinar la precipitación de diseño en base a una probabilidad de ocurrencia dada. Para ello, se obtiene el valor de la variable "x" de la ecuación respectiva a la FDP seleccionada.

Coeficiente de Escorrentía

Se define al coeficiente de escorrentía como la proporción del agua precipitada que escurre superficialmente. Y ello obedece a que no toda la lluvia que cae sobre una superficie genera escorrentía, ya que existen pérdidas por infiltración, evaporación y retención de la superficie, dependiendo del tipo de suelo o del material sobre el cual se recibe a la lluvia. Por ende, en un sistema de captación de aguas lluvias, será deseable que el coeficiente de escorrentía del área de captación sea lo más cercano

al valor 1, con el fin de propiciar la mayor tasa de escorrentía superficial para su almacenamiento.

2.2 Dimensionamiento del SCALL

Con la precipitación de diseño obtenida se calculan las dimensiones del área de captación y del estanque acumulador, para lo que se dan dos casos. En el primero, se define a priori un volumen de agua a almacenar, por ejemplo, si se cuenta con un hidroacumulador de cierto volumen, o si se tiene definida la demanda que se desea cubrir. Entonces habrá que calcular el área de captación necesario para dicho volumen. En el segundo caso, si se cuenta con una determinada área de captación, entonces se calculará el volumen de agua posible de acumular. En el presente estudio se definió un volumen a almacenar y se estimó el área de captación, usando la siguiente expresión:

$$A_{cap} = \frac{V_c}{P * C} \tag{21}$$

donde

- A_{cap} Área de captación en la ladera (m^2)
- V_c Volumen del hidroacumulador y/o volumen a capturar por año (m^3)
- P Precipitación de diseño (m)
- C Coeficiente de escorrentía del área de captación

3. RESULTADOS

Se muestran los resultados obtenidos de las experiencias desarrolladas en la Región del Maule (2018) y en la Región de Valparaíso (2015). A priori se buscaron y se seleccionaron los sitios donde se construirían las obras, de acuerdo a los objetivos planteados en cada proyecto.

3.1 Obtención de la precipitación de diseño

Selección de estaciones pluviométricas

Para cada sitio se seleccionó una estación pluviométrica cercana y se obtuvo la serie de precipitación anual (Tabla 1). Se buscaron estaciones pertenecientes a la Dirección General de Aguas, entidad perteneciente al Ministerio de Obras Públicas de Chile, o a la Dirección Meteorológica de Chile, perteneciente a la Dirección General de Aeronáutica Civil, ya que ambas instituciones poseen estaciones de larga data y cumplen con los estándares de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Tabla 1. Sitios donde se construyeron los SCALL y las estaciones pluviométricas para cada sitio

Región	Sitio	Estaciones pluviométricas	Ubicación estación		Período	Registro total (años)
			Lat.S	Long.W		
Valparaíso	Las Palmas y Santa Julia, Petorca	Palquico	32°15'10''	71°08'19''	1973-2014	41
Valparaíso	Santa María de Pullally, Papudo	Longotoma	32°33'32''	71°22'30''	1980-2014	34
Valparaíso	El Leoncito, Puchuncaví	Laguna de Zapallar	32°35'31''	71°25'56''	1988-2014	26
Valparaíso	Reserva Lago Peñuelas	Lago Peñuelas	33°08'42''	71°33'19''	1974-2014	40
Maule	R.Muñoces, S.Clemente	Durazno	35° 29' 11"	71° 17' 35"	1970-2015	45
Maule	Las Lomas, S. Clemente	Durazno	35° 29' 11"	71° 17' 35"	1970-2015	45
Maule	Ranchillo, San Javier	Nirivilo	35° 32' 20"	72° 05' 29"	1962-2015	54
Maule	El Trigal, San Javier	Nirivilo	35° 32' 20"	72° 05' 29"	1962-2015	54
Maule	Macal, Constitución	Gualleco	35° 14' 38"	71° 58' 48"	1962-2015	54
Maule	Pantaniillo, Curepto	Gualleco	35° 14' 38"	71° 58' 48"	1962-2015	54

Ajuste a una función de distribución de probabilidad

Una vez definida la estación, los datos de precipitación anual se ajustaron a funciones de distribución de probabilidad. Aunque la función de Gumbel es la que ha dado mejores resultados para registros hidrológicos, se probaron otras FDP, como la de Goodrich, log Normal y Pearson III. A modo de ejemplo, se muestran estos ajustes para la estación Lago Peñuelas de la Región de Valparaíso, perteneciente a la DGA (Tabla 2). Para el cálculo de la precipitación de diseño, se propone trabajar con una probabilidad de excedencia de 0.9 o con una probabilidad ocurrencia de 0.1. Es decir, se espera que en al menos 9 años de 10, la precipitación anual sea mayor a la de diseño, y se capture un volumen de agua mayor o igual que el volumen definido en el diseño. Esto se basa en que esta probabilidad es considerada rentable desde un punto de vista económico, ya que probabilidades superiores, por ejemplo, si se considera que en 99 de cada 100 años se obtendrá la precipitación de diseño, se establecerá

una estructura de grandes dimensiones con un alto costo de oportunidad, determinando una subutilización muy alta de la infraestructura construida. Por ello, se estima que un 90% es una probabilidad de éxito recomendable (Fernández et al, 2017; Unesco, 2015). Como se observa en la tabla anterior, una diferencia entre las FDP es el número de parámetros que deben ajustarse, lo cual incide en la complejidad de su uso. Para esta estación las funciones de Gumbel y Log-Normal arrojan una precipitación de diseño similar ($x_i = 344$ y 346 mm, respectivamente). Al realizar las pruebas de bondad de ajuste (Tabla 3) se observa que todos los ajustes se aceptan para la prueba de K-S, y que los valores del coeficiente de determinación son similares y altos. Es decir, las cuatro FDP son válidas, no obstante, como ya se mencionó la función del Gumbel es la que se recomienda para registros hidrológicos. En la Tabla 4 se presenta la función de Gumbel ajustada y sus respectivas validaciones para las estaciones consideradas.

Tabla 2. Parámetros ajustados a las cuatro FDP para precipitación anual de la estación Lago Peñuelas, Región de Valparaíso, Chile.

Gumbel		Goodrich		Log-normal		Pearson III	
Promedio	687.11	Promedio	687.11	Promedio	687.11	Promedio	687.11
Desviación	311.56	Des. Est.	311.56	Des. Est	311.56	Des. Est	311.56
U	546.89	N	41	A	6.4250	Γ	0.58
D	0.004	s³	30,241,934.61	B	0.4831	B	11.89
N	41	m₃	17,541,398.51	F(x)	0.1	α	90.36
F(x)	0.1	P(p)	0.580	Xi	345.60	δ	-387.16
Xi	344.29	P (interp)	0.481			F(x)	0.1
		p+1	1.481			Xi	283.74
		s²	97,067.32				
		Y (2p+1)	0.996				
		Y (p+1)	0.886				
		A	1.22E-06				
		X1	86.1759				
		F(x)	0.1				
		Xi	315.99				

Tabla 3. Resumen de las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov y R2 para las cuatro funciones ajustadas a la serie precipitación anual de la estación Lago Peñuelas

FDP Ajustada	Dc	Dt	Ajuste K-S	R ²	Pp de diseño (mm)
Gumbel	0.0722	0.2076	Acepta Ho	0.9885	344.29
Goodrich	0.0776	0.2076	Acepta Ho	0.9854	315.99
Log- normal	0.0526	0.2076	Acepta Ho	0.9939	345.60
Pearson III	0.0756	0.2076	Acepta Ho	0.9840	283.74

Tabla 4. Ajustes de las series de precipitación anual a la Función de Gumbel y sus pruebas de bondad de ajuste.

Estaciones	Función de Gumbel ajustada (F(x))	R ²	K - S (acepta Ho)*	
			Dt	Dc
Palquico	$e^{-e^{-0.009*(x-202.19)}}$	0.981	0.2224	0.092
Longotoma	$e^{-e^{-0.008*(x-208.34)}}$	0.967	0.284	0.094
Laguna de Zapallar	$e^{-e^{-0.008*(x-183.32)}}$	0.986	0.209	0.081
Lago Peñuelas	$e^{-e^{-0.004*(x-546.89)}}$	0.993	0.207	0.072
Gualleco	$e^{-e^{-0.004*(x-649,20)}}$	0.995	0.185	0.069
El Durazno	$e^{-e^{-0.005*(x-735,24)}}$	0.970	0.260	0.101
Huapi	$e^{-e^{-0.004*(x-826,54)}}$	0.991	0.197	0.061
Nirivilo	$e^{-e^{-0.004*(x-656,13)}}$	0.988	0.185	0.084

(*): se acepta Ho si Dt > Dc

3.2 Coeficiente de escorrentía

Como ya se mencionó, el coeficiente de escorrentía depende de la superficie sobre la cual se produce el escurrimiento. Para el caso del uso de geomembrana como cubierta impermeabilizante se utilizó un coeficiente de 0.85 el que fue estimado por Unesco (2015).

3.3 Dimensiones de los SCALL construidos

Se establecieron las dimensiones de los SCALL en base a la precipitación de diseño ajustada y validada para cada lugar. Para el área de captura se utilizó geomembrana, por lo que el coeficiente de escorrentía tiene un valor de 0.85 y para almacenar el agua se implementaron estanques flexibles de dos tamaños: de 30 y 80 m³ (Tabla 5).

Tabla 5. Dimensiones de los sistemas de aguas lluvias implementados

	Pp diseño (mm)	Volumen a almacenar (m ³)	Área de captura (m ²)
Las Palmas, Petorca	86.6	30	407
Santa Julia, Petorca	86.6	30	407
Santa María de Pullalli, Papudo	103.7	30	340
El Leoncito, Puchuncaví	110.6	30	320
Reserva Peñuelas, Valparaíso	344.3	30	103
R.Muñoces, S.Clemente	558	80	211
Las Lomas, S. Clemente	558	80	211
Ranchillo, San Javier	461	80	255
El Trigal, San Javier	461	80	255
Macal, Constitución	459	80	256
Pantanillo, Curepto	459	80	256

3.4 Área de captación

En este paso es importante la limpieza y nivelado del área para la instalación de una superficie impermeable. Cabe destacar que la pendiente mínima del área de captura se recomienda entre 5-10% para asegurar el escurrimiento de la lluvia captada. En un principio, para esta superficie se probaron 2 opciones: geomembrana y radier de hormigón.

Área de captación con geomembrana

En el caso de la geomembrana se utilizó geomembrana negra lisa de HDPE de 1 mm de espesor y cuyo fusionado se realizó con máquina soldadora de cuña caliente (a una temperatura de 420°C). Un aspecto a considerar es el anclaje de la geomembrana en el suelo, con el fin de evitar que esta sea removida y desplazada por el viento, para lo cual se utilizaron 2 sistemas:

- i. Entierro de la geomembrana en una zanja con camellón: se hace una zanja con camellón por todo el perímetro del área de captación,

de 30 cm de profundidad, con el propósito de que el borde de la geomembrana cubra el camellón y se entierre en la zanja, para posteriormente tapar con material de la excavación.

- ii. Estructura de soporte de geomembrana: consiste en un armazón de polines de madera que se construye en el perímetro del área de captación, que es la que sostendrá a la geomembrana. Este método toma más tiempo que el primero y requiere tener cuidado de evitar el roce de la geomembrana con el armazón para que no se desgaste ni se dañe.

La elección del sistema de anclaje está ligada a las características del terreno y materiales disponibles, aunque el primero requiere menos tiempo si se cuenta con maquinaria.

Área de captación de hormigón

Consiste en un radier que se adecúa a la pendiente, con un espesor mínimo de 8 a 10 cm con una malla

ACMA C-139 en la parte inferior. El hormigón utilizado fue un H-20 y se recomienda un premezclado para garantizar la calidad del mismo. Se recomienda hacer una terminación con una máquina alisadora de hormigón, para que el coeficiente de

escorrentía sea lo más alto posible. Este captador lleva un borde en todo su perímetro de 30 cm de altura y está construido también en hormigón (Figura 3).



Figura 2. Anclaje de la geomembrana: enterrada en una zanja perimetral (izquierda) y armazón de polines (derecha)



Figura 3. Áreas de captación utilizadas (izquierda: Geomembrana; derecha: Hormigón)

Comparación de geomembrana y hormigón

Como se mencionó anteriormente, en las primeras experiencias (2012) se implementaron SCALL utilizando como área de captación, geomembrana y cubierta de hormigón (Unesco, 2015). Se evaluó el coeficiente de escorrentía de ambos materiales, con el fin de determinar cuál de los dos es más eficiente en generar escorrentía superficial dado un monto de lluvia. Se encontró que la geomembrana presenta un coeficiente mayor, con valores que fluctúan entre 0.85 a 0.9 mientras que el hormigón generó valores cercanos al 0.7. Es decir, dado un monto de lluvia, la

geomembrana genera un mayor volumen de escorrentía superficial lo que se traduce en un mayor volumen de agua a almacenar.

3.5 Estanque de acumulación

En un principio se utilizaron varios tipos de estanques de acumulación, a saber, estanque vertical de fibra de vidrio (20 m³), estanque vertical de polietileno (30 m³), estanque tipo australiano (40 m³), estanques flexibles de PVC (20, 30 y 50 m³) y excavaciones impermeabilizadas con geomembrana (50 y 60 m³) y hormigón (30 m³), ambas techadas

(Pizarro et al., 2016). De ellos, el estanque flexible es el más recomendable ya que posee varias ventajas respecto a los demás. Entre ellas, su fácil traslado ya que al estar vacío se puede doblar como una bolsa; es totalmente cerrado, impidiendo la entrada de luz y oxígeno que puedan alterar la calidad del agua; su

volumen se expande de acuerdo a la cantidad de agua acumulada, y tiene la mejor relación costo/beneficio. Por ello, en los SCALL construidos con posterioridad se utilizaron hidroacumuladores de estanque flexibles de 30 y 80 m³, no obstante, en el mercado existe una variedad de volúmenes de acuerdo a las necesidades.



Figura 4. Sistema de Captación de Aguas Lluvias instalado en la Región del Maule (sector Rincón de los Muñoces, Región del Maule), con área de captación de geomembrana y estanque flexible de 80 m³

3.6 Otros análisis

Calidad de agua

Del agua lluvia almacenada en los distintos hidroacumuladores se extrajeron muestras para someterlas a análisis físico-químico del agua con el fin de verificar su calidad para los distintos usos. El análisis se basó en las normas chilenas NCH 409, para agua potable y la norma NCH 1.333 para riego. Se encontró que el agua almacenada era de buena calidad, tanto para la norma de agua potable como para la de riego. Incluso después de 6 meses de tomadas las muestras, el agua mostró tener una muy buena calidad (Pizarro et al, 2016). Cabe destacar que análisis se realizó en los SCALL con el área de captura cubierta con geomembrana y hormigón; no se

han realizado estas pruebas para el agua capturada en techo.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir del desarrollo e implementación de los SCALL se pudieron establecer algunos criterios para su construcción. Un primer elemento es determinar los parámetros hidrológicos del diseño, los que dependen de la precipitación y del material impermeabilizante del área de captura. La precipitación es muy relevante por la alta variabilidad que esta tiene en todo el territorio nacional y es el principal factor para determinar las dimensiones de las obras y los volúmenes a almacenar. En este sentido, se recomienda el uso de la Función de

Distribución de Probabilidad de Gumbel y una probabilidad de excedencia del 0.9 para obtener la precipitación de diseño. Con ello, se espera que 9 de cada 10 años se capture como mínimo, el volumen diseñado y se generen excedentes de agua. Por otra parte, el material definido para el área de captura de la lluvia incide en el coeficiente de escurrimiento, es decir, en el volumen de agua que escurre a partir de la precipitación. Por ello, se debe buscar materiales con un mayor coeficiente, siendo recomendable el uso de geomembrana, ya que presenta un coeficiente de escurrimiento de 0.85. En relación al hidroacumulador se recomienda un estanque

hermético que impida el contacto del agua con la luz y oxígeno, para evitar la propagación de microorganismos que afecten la calidad del agua almacenada. Finalmente, para la construcción y diseño de los SCALL en zonas rurales se recomienda el uso de estanques flexibles para acumular el agua, mientras que para impermeabilizar el área de captura se recomienda el uso de geomembrana. Esto tomando en cuenta la facilidad en su instalación, mantiene la calidad del agua y presenta la mejor relación costo/beneficio en términos hidrológicos y económicos.

REFERENCIAS

- Fernández, P., Bonomelli, C., Guevara, C., Menéndez-Miguélez, M., Celis, V., Barrera, C., Preller, C., Pizarro, R., Sangüesa, C., Doll, U., Campos, D., Berríos, Á., Vallejos, C., Mendoza, R., Pino, J. (2017). Sistema de Captación de Aguas Lluvias (SCALL) y su aplicación en el establecimiento de maqui. Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca y Pontificia Universidad Católica de Chile. ISBN 978-956-329-075-2.
- García-Chevesich, P., Valdes-Pineda, R., Neary, D., Pizarro, R. (2015). Using rainwater harvesting techniques for firefighting in forest plantations. *Journal of Tropical Forest Science*. 27(1): 1–2.
- Pizarro, P., Ingram, B., Gonzalez-Leiva, G., Valdés-Pineda, R., Sangüesa, C., Delgado, N., García-Chevesich, P., Valdés, J.B. (2018). WEBSEIDF: A Web-Based System for the Estimation of IDF Curves in Central Chile. *Hydrology*, 5, 40; doi:10.3390/hydrology5030040
- Pizarro, R., Urbina, F., Vallejos, C., Mendoza, R., Guzmán, J., Tapia, J., Sangüesa, C., Campos, D., Pino, J., Saenz, R., Tigero, T., García, P., Ibarra, J., Abarza, A., Garrido, R., Ruiz, R., Morales, Carolina., Avendaño, C. (2016). Diseño y Construcción de Sistemas de Captación de Aguas Lluvias (SCALL): una experiencia de 3 años Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental, Universidad de Talca. Chile. ISBN 978-956-329-070-7.
- Pizarro, R.; Ausensi, P.; Aravena, D.; Sangüesa, C.; León, L.; Balocchi, F. (2009). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la región del Maule, Chile. *Revista Aqua Lac, Programa Hidrológico Internacional*. Vol. 1. N° 2. Pp. 172 – 185
- Pizarro, R., Novoa, P. (1986). Elementos técnicos de Hidrología I. Instructivos técnicos. La Serena, Chile. Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura. 57 p.
- Sangüesa, C., Pizarro, R., Ibañez, A., Pino, J., Rivera, D., García-Chevesich, P., Ingram, B. Spatial and Temporal Analysis of Rainfall Concentration Using the Gini Index and PCI. (2018). *Water*, 10(2), 112; doi:10.3390/w10020112
- UNESCO. (2015). Manual de diseño y construcción de sistemas de capacitación de aguas lluvias en zonas rurales de Chile Documento Técnico N° 36. ISBN 978-92-9089-198-7.
- Valdes-Pineda, R., García-Chevesich, P., Valdés, J.B., Pizarro-Tapia, R. (2020). The First Drying Lake in Chile: Causes and Recovery Options. *Water* 2020, 12, 290; doi:10.3390/w12010290



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license