



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
UNIDAD REGIONAL UNIVERSITARIA DE ZONAS ÁRIDAS
MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS
ÁRIDAS

**SISTEMA DE APOYO PARA OPTIMIZAR LA CAPTACION DE AGUA DE
LLUVIA A PARTIR DE TECHOS (SCALLPT) PARA CONSUMO HUMANO Y
AGRICULTURA DE TRASPATIO EN ZONAS MARGINALES**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE
EN ZONAS ÁRIDAS**

Presenta:

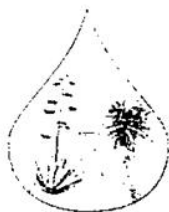
ING. SAMUEL RICARDO AGUILAR NOYOLA

Bajo la supervisión de:

DR. IGNACIO SÁNCHEZ COHEN



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORDENA DE EXAMENES PROFESIONALES



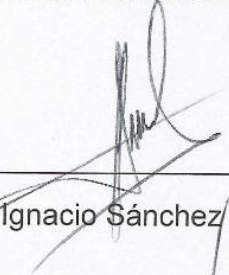
Bermejillo, Durango, abril de 2019

**SISTEMA DE APOYO PARA OPTIMIZAR LA CAPTACION DE AGUA DE
LLUVIA A PARTIR DE TECHOS (SCALLPT) PARA CONSUMO HUMANO Y
AGRICULTURA DE TRASPATIO EN ZONAS MARGINALES**

Tesis realizada por **SAMUEL RICARDO AGUILAR NOYOLA** bajo la supervisión
del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

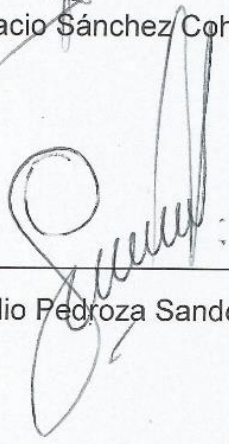
**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

DIRECTOR:



Dr. Ignacio Sánchez Cohen

CO-DIRECTOR:



Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

ASESOR:



Dr. Donald Carl Slack

Bermejillo, Durango. Abril del 2019.

Contenido

1. Capítulo I	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo General	3
1.2.1 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	3
1.4 LITERATURA CITADA	4
2. Capítulo II	6
2.1 Revisión de Literatura	6
2.1.1 Prácticas de manejo del agua	6
2.1.2 Situación actual de los recursos hídricos	6
2.1.3 Captación de agua de lluvia	7
2.1.4 Generación estocástica de precipitación	12
2.1.5 Cambio Climático	15
2.1.6 Agricultura de traspatio	15
2.2 LITERATURA CITADA	16
3. Capítulo III	20
3.1 Resumen	20
3.2 Abstract.....	20
3.3 Introducción	21
3.4 Materiales y Métodos.....	23
3.4.1 Fase de laboratorio	23
3.4.2 Fase experimental.....	25
3.5 Resultados y Discusión.....	30
3.6 Conclusiones	34
3.7 Literatura Citada	35
4. Capítulo III	37
4.1 Resumen	37
4.2 Abstract.....	37

4.3	Introducción	38
4.4	Materiales y Métodos.....	40
4.4.1	Desarrollo de la herramienta computacional	40
4.4.2	Generación estocástica de lluvia.....	46
4.5	Resultados y Discusión.....	50
4.5.1	Análisis posterior	52
4.6	Conclusiones	54
4.7	Literatura citada	54

Lista de cuadros

Cuadro 1	Localidades incluidas en el muestreo para la caracterización del tipo de techumbre.	26
Cuadro 2	Coeficientes de escurrimiento para las diferentes tipos de techumbre muestreadas.	31
Cuadro 3	Precipitación antecedente necesaria para iniciar el escurrimiento acorde a la ecuación No. 3.	31
Cuadro 4	Consumo típico de agua en viviendas rurales en zonas áridas del norte de México.	44
Cuadro 5	Requerimientos de agua promedio por tipo de clima, cultivo y fechas de cosecha para distintas hortalizas (Blower y Heibloen, 1986).....	48

Lista de figuras

Figura 1	Simulador de lluvia en el proceso de calibración	23
Figura 2	Manifold para controlar la presión de operación del simulador de lluvia y planta de luz como fuente de energía. La carga de operación del aspersor fue de 15 PSI.	24
Figura 3	Proceso de recolección de los volúmenes de cada pluviómetro.....	25
Figura 4	Características de las comunidades muestreadas en cuanto a los usos del agua	27
Figura 5	Curvas de intensidad de lluvia-duración-frecuencia para un periodo de retorno de 10 años para el estado de Durango (disponible en:	

http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/	28
Figura 6 Climogramas para las municipalidades de Mapimí (izquierda) y Tlahualilo (derecha) en el estado de Durango.	28
Figura 7 Tiempo de inicio del escurrimiento (izquierda) y medición del volumen recolectado (derecha).	29
Figura 8 Relación presión-tasa de lluvia (mm.hr^{-1}). Nótese que a 30 PSI de presión, el gasto aproximado del aspersor es 70 mm.hr^{-1}	30
Figura 9 Diferentes techumbres evaluadas y su condición. Izquierda en buena condición y derecha en mala condición. Arriba cemento, en medio tierra y abajo lámina galvanizada.	33
Figura 10 Dependencia del coeficiente de escurrimiento (CE) con la intensidad de lluvia.....	34
Figura 11 Rezago social y condiciones de sequía en México. Con información de CONAPO (2002). Condiciones de sequía elaboradas de acuerdo al Índice Estandarizado de Precipitación (Sánchez-Cohen et al 2015)	40
Figura 12 Diagrama de flujo general del software utilizado para realizar el balance hídrico.....	42
Figura 13 Interfaz para elegir los parámetros del balance hídrico.	43
Figura 14 Parámetros de entrada para las necesidades de agua de acuerdo a la disponibilidad de la misma (A), el coeficiente de escurrimiento (B) y el tipo de clima (C).	44
Figura 15 Localidades encuestadas para la caracterización hidrodinámica de los techos. Se muestran los estados de Durango y Coahuila con los municipios estudiados (Mapimí con cinco comunidades y Tlahualilo con dos).....	45
Figura 16 Proceso para obtener el coeficiente de escurrimiento en un techo de cemento en buenas condiciones (izquierda) y en malas condiciones (derecha). Nótese el simulador de lluvia.	46
Figura 17 Ejemplo de resultados de lluvia mensual.....	51
Figura 18 Ejemplo de resultados. Dentro de la interface de resultados se encuentran diversas opciones para desplegar.....	52
Figura 19 Función de densidad probabilística del escurrimiento promedio mensual recolectado en 50 años de simulación para un tipo de techo dado de donde el usuario puede obtener la probabilidad de que ocurra un evento de cierta magnitud. Para este ejemplo, el valor promedio es 0.385 y la desviación estándar es de 1.33 m^3	53

Dedicatoria

A mis padres que con su ejemplo me han enseñado que una vida de amor y servicio es posible y que todos los días me impulsan a llegar más alto.

Agradecimientos

En primer término agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo y los recursos brindados para la realización de este trabajo de investigación; así como a la Universidad Autónoma Chapingo por recibirme en la institución y brindarme la oportunidad de continuar con mi preparación.

Al Dr. Aurelio Pedroza Sandoval y a todo el equipo que conforma el Posgrado de Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas por todo su apoyo y enseñanzas a lo largo de estos dos años.

Al Dr. Ignacio Sánchez Cohen, director de este proyecto de investigación por su paciencia y guía y por compartir sus conocimientos durante el desarrollo del presente trabajo.

A Clelia Morán y Mary Miranda, secretarías administrativas de Posgrado, quienes con su labor hacen más llevaderos los siempre tediosos procesos burocráticos.

Al M.C. José Antonio Chávez Rivero y a Joel Burgueño Aguirre por el apoyo brindado durante el trabajo de campo de esta investigación.

Datos biográficos

Nombre: Samuel Ricardo Aguilar Noyola

Fecha de nacimiento: 20 de abril de 1993

Lugar de nacimiento: Torreón, Coahuila, México



Estudió el bachillerato en la Preparatoria Federal por Cooperación LUZAC en el periodo 2008-2011 en la ciudad de Torreón, Coahuila y la licenciatura en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna en la misma ciudad en el periodo 2011-2015, obteniendo el título de Ingeniero en Procesos Ambientales mediante la modalidad “Promedio”.

Con recursos de CONACyT cursó sus estudios de Maestría en la Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas ubicada en la localidad de Bermejillo, Mapimí, Durango, México en el periodo 2017-2018. Con el proyecto “Sistema de apoyo para optimizar la captación de agua de lluvia para consumo humano y agricultura de traspatio en zonas marginales”.

RESUMEN GENERAL

Sistema de apoyo para optimizar la captación de agua de lluvia a partir de techos (SCALLPT) para consumo humano y agricultura de traspatio en zonas marginales¹

En diversas regiones semiáridas, la precipitación es suficiente para mantener los asentamientos humanos, pero la distribución irregular de las lluvias provoca periodos largos de sequía que llevan a la población a una deficiencia de agua para cubrir las necesidades básicas. Los sistemas de captación de agua de lluvia a partir de techos (SCALLPT) se presentan como una fuente de agua alternativa para cubrir dichas necesidades. El objetivo de este estudio fue contribuir al conocimiento sobre los SCALLPT, como base de sustentabilidad doméstica y productiva en comunidades con deficiencia hídrica a causa de la escasa precipitación pluvial. Se aplicaron encuestas en siete comunidades rurales del norte de México y posteriormente se realizaron simulaciones de lluvia para caracterizar hidrodinámicamente los diferentes tipos de techos ahí encontrados. Con la información recabada se alimentó el código de un programa que permite realizar un análisis del balance hídrico de manera sencilla, para el almacenamiento del agua de lluvia. Se encontraron tres tipos de techos: tierra, cemento y lámina galvanizada. De éstos, la lámina galvanizada tiene el coeficiente de escurrimiento más alto (0.99) mientras que en los techos de tierra no hubo escurrimiento en algunas pruebas. La interfaz del programa permite observar los resultados en forma de tablas o gráficos, lo que facilita el entendimiento a los habitantes y técnicos que implementan SCALLPT. La herramienta cumple el propósito para el que fue diseñada: estimar tanto el volumen de agua que podría ser captado bajo condiciones locales específicas como la capacidad del tanque de almacenamiento, sin embargo, la condición de las techumbres reduce considerablemente el valor del coeficiente de escurrimiento, por lo que no se obtendrían las cantidades de agua para satisfacer las necesidades de la vivienda.

Palabras clave: coeficiente de escurrimiento, simulación de lluvia, programa computacional, zonas áridas

¹ Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo

GENERAL ABSTRACT

Support system to optimize rooftop rainwater harvesting (RRHS) for human consumption and backyard agriculture in outcast regions

In many drylands, rainwater is enough for maintaining human settlements, but its irregular distribution leads to large dry periods which cause water scarcity among the inhabitants, making it hard to meet their basic necessities. Roof rainwater harvesting systems (RRHS) may become an excellent alternative source of water to satisfy such needs. That is why, this work's aim is to contribute to RRHS acknowledgment as ground for domestic and productive sustainability among communities with water scarce due to little precipitation. A poll was conducted in seven rural communities of Northern México and later, rain simulations were performed in order to quantify the households' rooftop hydrodynamic. A software was fed with this information; the software allows us to analyze water balance in a simple way. Three roof types were found: galvanized sheet, soil and cement. Galvanized sheet roofs resulted with the highest runoff coefficient (0.99) meanwhile the soil roofs hardly produced any runoff. The software's interface enables the user to look at the results in a tabulated or a graphic design so it is easier for inhabitants and technicians to understand them. This software meets its purpose of estimating both: the possible rainwater to be harvested under specific conditions and the needed tank size, nonetheless, the state of the rooftops diminishes their runoff coefficient, which prevents the system from harvesting enough water to meet the household's needs.

Keywords: runoff coefficient, rain simulation, software, dryland

1. CAPÍTULO I

SISTEMA DE APOYO PARA OPTIMIZAR LA CAPTACION DE AGUA DE LLUVIA A PARTIR DE TECHOS (SCALLPT) PARA CONSUMO HUMANO Y AGRICULTURA DE TRASPATIO EN ZONAS MARGINALES

1.1 INTRODUCCIÓN

La sociedad depende del agua como un recurso vital, al igual que todo biosistema en el planeta, por lo que la gestión adecuada de este recurso es importante en el desarrollo integral sustentable que mitigue el impacto ambiental y permita una mejor calidad de vida de las personas (Vieira *et al.*, 2014). El desarrollo urbano, industrial y agropecuario ejercen una demanda creciente de los recursos hídricos, lo cual está llevando a la sobre explotación de los mismos (Abdulla y Al-Shareef, 2009).

De acuerdo a Matos Silva *et al.* (2015), una mejor gestión del agua se basa en la reducción en el consumo y la identificación de nuevas fuentes de agua. Respecto a esta última, el sistema de captación de agua de lluvia a partir de techos (SCALLPT) puede ser una fuente complementaria de agua para ser usada en diferentes actividades domésticas y productivas (Al-Houri *et al.*, 2014).

En diversas regiones semiáridas, la precipitación es suficiente para mantener los asentamientos humanos, pero la distribución irregular de las lluvias provoca periodos largos de sequía que impactan a la población con una deficiencia de agua para cubrir las necesidades básicas (Lasage y Verburg, 2015). Los SCALLPT a nivel doméstico y de producción familiar se han convertido en una opción importante como posible fuente de agua, especialmente en áreas urbanas y suburbanas con acceso limitado a agua potable (Campisano y Modica, 2012).

La captación de agua de lluvia consiste en un amplio rango de tecnologías usadas para recolectar, almacenar y proveer agua con el objetivo de satisfacer la demanda hídrica de los humanos y sus actividades productivas (Dwivedi *et al.*, 2013). La característica más atractiva de los SCALLPT es su menor costo, accesibilidad y fácil mantenimiento a nivel doméstico (Al-Houri *et al.*, 2014). El agua recolectada sin tratamiento puede ser usada

con fines de aseo o riego de agricultura de traspatio; mientras que al darle un tratamiento básico, puede ser usada para consumo (Abdulla y Al-Shareef, 2009; Helmreich y Horn, 2009; Londra *et al.*, 2015). Los SCALLPT son una de las técnicas más amigables y económicamente viables para la recolección de agua de lluvia (Pawar *et al.*, 2014).

Los SCALLPT son una propuesta sustentable y fácilmente aplicable para proveer agua tanto en países industrializados, como en aquéllos en vías de desarrollo (Cain, 2014). El agua de lluvia está libre de salinidad, así como de arsénico y es segura mientras se almacene de manera higiénica (Biswas y Mandal, 2014), es por esto que este tipo de sistema se ha vuelto indispensable a medida que el acceso a agua potable de calidad disminuye (Pawar *et al.*, 2014) y una alternativa viable para reducir la escasez de agua en regiones semiáridas (Helmreich y Horn, 2009). Países como Nigeria (Shittu *et al.*, 2015), India (Biswas y Mandal, 2014; Pawar *et al.*, 2014), Australia (van der Sterren *et al.*, 2013), Sudáfrica (Baiyegunhi, 2015), Malta (Bezzina y Scicluna, 2016), Jordania (Abdulla y Al-Shareef, 2009; Al-Houri *et al.*, 2014) y Brasil (Doss-Golin *et al.*, 2016) han invertido en el desarrollo y optimización de SCALLPT.

Los SCALLPT tienen tres objetivos principales: proveer agua como una respuesta estratégica al desarrollo urbano; satisfacer en la mayor medida posible la demanda hídrica de un edificio o vecindario y; obtener resultados económicos, ambientales y sociales que justifiquen su aplicación (Morales-Pinzón *et al.*, 2015). Los ejemplos más comunes en el uso de SCALLPT corresponden a aquéllos donde la demanda hídrica es pequeña y no se requiere de agua potable (Sanches-Fernandes *et al.*, 2015) y en términos modernos son usados como una solución para la administración del agua (Kumar *et al.*, 2008).

La confiabilidad de los SCALLPT es primordial cuando éstos se convierten en la única fuente de agua potable disponible (Pelak y Porporato, 2016), por lo que, su diseño generalmente se enfoca en determinar el tamaño óptimo del reservorio de agua, comúnmente llamado cisterna, que garantice el abasto de agua. Una cisterna demasiado grande provoca pérdidas de energía y recursos económicos; mientras que una muy pequeña no podrá cubrir la demanda hídrica. Por lo tanto, los hábitos de consumo, así

como las características de la localidad deben ser tomados en cuenta al diseñar un SCALLPT (Mahmudul *et al.*, 2016).

La metodología para determinar el tamaño de la cisterna puede variar dependiendo del país aunque, básicamente, la capacidad de la misma puede ser determinada utilizando el balance hídrico diario o mensual o el método de demanda durante el periodo seco (Londra *et al.*, 2015). Sin embargo no se ha definido una línea de trabajo lógica para dimensionar la cisterna de los sistemas (Sanches-Fernandes *et al.*, 2015). Con el propósito de apoyar de manera práctica y objetiva en el diseño del tamaño y otras características de este tipo de reservorios hídricos, se han desarrollado diferentes modelos de simulación (Morales-Pinzón *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2017) en los que se toman en cuenta factores como el coeficiente de escurrimiento y el cambio en las condiciones hidrológicas locales (Liu *et al.*, 2015), con fundamento más teórico que práctico.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento sobre los sistemas de captación de agua de lluvia a partir de techos, como base de sustentabilidad doméstica y productiva en comunidades con deficiencia hídrica a causa de la poca precipitación pluvial.

1.2.1 Objetivos específicos

- Identificar las condiciones sociales y ambientales en términos hídricos en que se encuentran las poblaciones del área de influencia del presente estudio en la zona norte de Durango, México.
- Calibrar un algoritmo como herramienta en la toma de decisiones para optimizar el diseño e incrementar la productividad del agua de lluvia en zonas bajo incertidumbre climática.

1.3 HIPÓTESIS

Ho1: La incertidumbre climática, genera carencia de recursos hídricos para las necesidades más básicas de la población rural en zonas áridas marginadas.

Ho2: El diseño y operación de un sistema práctico para la toma de decisiones en la captación de agua de lluvia a partir de techos y su uso en actividades domésticas y de

producción familiar, es básico para mitigar la carencia de los recursos hídricos en comunidades rurales marginadas.

1.4 LITERATURA CITADA

- Abdulla, F. y Al-Shareef, A. W. 2009. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination* 243:195-207.
- Al-Houri, Z., Abu-Hadba, O. and Hamdan, K. 2014. The Potential of Roof Top Rain Water Harvesting as a Water Resource in Jordan: Featuring Two Application Case Studies *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 8:147-153.
- Baiyegunhi, L. 2015. Determinants of rainwater harvesting technology (RWHT) adoption for home gardening in Msinga, KwaZulu-Natal, South Africa. *Water SA* 41:33-39.
- Bezzina, F. and Scicluna, I. 2016. Exploring rainwater harvesting opportunities in Malta. *Management of Environmental Quality: An International Journal* 27:390-406.
- Biswas, B. and Mandal, B. 2014. Construction and evaluation of rainwater harvesting system for domestic use in a remote and rural area of Khulna, Bangladesh. *International Scholarly Research Notices* 2014:1-6.
- Cain, N. 2014. A Different Path: The Global Water Crisis and Rainwater Harvesting. *Consilience: The Journal of Sustainable Development* 12:147-157.
- Campisano, A. and Modica, C. 2012. Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling* 63:9-16.
- DeBusk, K., W., H. and Wright, J. 2013. Characterizing rainwater harvesting performance and demonstrating stormwater management benefits in the humid southeast USA. *Journal of the American Water Resources Association* 49:1398-1411.
- Doss-Gollin, J., de Sousa F, F. and Eneas S, F. 2016. Analytic modeling of rainwater harvesting in the brazilian semiarid northeast. *Journal of the American Water Resources Association* 52:129-137.
- Dwivedi, A., Patil, V. and Karankal, A. 2013. Rooftop rainwater harvesting for groundwater recharge in educational complex. *Global Journal of Researches in Engineering* 13:21-30.
- Helmreich, B. and Horn, H. 2009. Opportunities on rainwater harvesting. *Desalination* 248:118-124.
- Kumar, M., Patel, A. and Singh, O. 2008. Rainwater Harvesting in the Water-scarce Regions of India: Potential and Pitfalls. *Land Use and Water Resources Research* 6:289-314.
- Lasage, R. and Verburg, P. 2015. Evaluation of small scale water harvesting techniques for semi-arid environments. *Journal of Arid Environments* 118:48-57.

- Liu, Y., Liang, C., Ye, C. and Xiang, J. 2015. Ecological analysis of disturbance and disturbance intensity estimates for rainwater harvesting. *Polish Journal of Environmental Studies* 24:1153-1158.
- Londra, P. A., Theocharis, A. T., Baltas, E. and Tsihrintzis, V. A. 2015. Optimal Sizing o Rainwater Harvesting Tanks for Domestic Use in Greece. *Water Resour Manage* 29:4357-4377.
- Lopes, V., Fernandes, G., Dornelles, F. and Medellin-Azuara, J. 2017. Performance of rainwater harvesting systems under scenarios of non-potable water demand and roof area typologies using a stochastic approach. *Journal of Cleaner Production* 148:304-313.
- Mahmudul, M., Rahman, A. and Samali, B. 2016. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production* 137:60-69.
- Matos Silva, C., Sousa, V. and Vaz Carvalho, N. 2015. Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to sigle-family residences. *Resources, Conservation and Recycling* 94:21-34.
- Morales-Pinzón, T., Rieradevall, J., Gasol, C. and Gabarrell, X. 2015. Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production* 87:613-626.
- Pawar, C., Patil, S. and Pawar, R. 2014. A case study of rooftop rainwater harvesting of Renavi village in Sangli District of Western Maharashtra: New approach of watershed development in India. *African Journal of Agricultural Research* 9:1941-1947.
- Pelak, N. and Porporato, A. 2016. Sizing a rainwater harvesting cistern by minimazing costs. *Journal of Hydrology* 541:1340-1347.
- Sanches-Fernandes, L., Terencio, D. and Pacheco, F. 2015. Rainwater Harvesting Systems for Low Demanding Applications. *Science of the total environment* 529:91-100.
- Shittu, O., Okareh, O. and Coker, A. 2015. Development of rainwater harvesting technology for securing domestic water supply in Ibadan, Nigeria. *International Research Journal of Engineering Science, Technology and Innovation* 4:32-37.
- van der Sterren, M., Rahman, A. and Dennis, G. R. 2013. Quality and Quantity Monitoring of Five Rainwater Tanks in Western Sydney, Australia. *Journal of Environmental Engineering* 139:332-340.
- Vieira, A., Beal, C., Ghisi, E. and Stewart, R. 2014. Energy intensity of rainwater harvesting systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34:225-242.

2. CAPÍTULO II

2.1 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.1 Prácticas de manejo del agua

Desde finales del siglo XIX, el crecimiento poblacional y los asuntos de salud pública revelaron la necesidad de mejorar las prácticas de manejo relacionadas al agua dentro de las ciudades, lo que trajo consigo el establecimiento de servicios sanitarios en la forma de redes de abastecimiento de agua potable y de drenaje. Estos servicios sanitarios permitieron asegurar el acceso al recurso hídrico y, en consecuencia, la población creció (Vieira et al., 2014).

Con el fin de satisfacer la creciente demanda de agua, se instalaron largas tuberías para llevar el agua desde fuentes lejanas, como presas, pozos y plantas de tratamiento, a los centros de población. Estas prácticas han demostrado ser insostenibles a largo plazo, por lo que el suministro de agua en diversas regiones del mundo se ha visto afectado. Estas afectaciones son visibles en los periodos cálidos de las zonas áridas, en donde se presentan temporadas largas con escasez de agua (Vieira et al., 2014).

2.1.2 Situación actual de los recursos hídricos

En los últimos años, el suministro de agua se ha convertido en un asunto vital a nivel global (Mehrabadi et al., 2013), ya que a pesar de que en las regiones húmedas, el acceso a fuentes superficiales de agua y la presencia de lluvias a lo largo del año genera una sensación de abundancia (DeBusk et al., 2013), debido a la sobrepoblación, las fuentes superficiales de agua han sido sobreexplotadas, lo que ha llevado a la implementación de pozos profundos tanto por parte de particulares como de los gobiernos. Al mismo tiempo que se incrementa el número de pozos, la recarga de los mismos se ve disminuida debido al desarrollo urbano. La explotación indiscriminada de los pozos conlleva a la disminución en el nivel del manto freático y por lo tanto, al incremento en las concentraciones de algunas sustancias peligrosas como los compuestos de flúor, nitratos y el arsénico (Kumar et al., 2008). Tal es la crisis que una de cada seis personas no tiene acceso a agua potable de calidad (Shittu et al., 2015).

La creciente tensión que sufren los recursos hídricos en la actualidad representa un reto para los científicos, ingenieros y legisladores porque el desarrollo de una nación, en todos los campos, depende en gran medida del acceso al agua (Abdulla and Al-Shareef, 2009).

En las comunidades marginadas, durante la temporada seca, la distancia que recorren las personas para obtener agua se incrementa mientras que la calidad de la misma se ve gravemente afectada (Doss-Gollin et al., 2016).

La crisis global de los recursos hídricos ha recibido una creciente atención por parte de activistas, corporaciones y gobiernos, lo que ha abierto un debate acerca de la mejor forma de ayudar a aquellos que carecen de agua limpia. A pesar de los muchos años de esta discusión, los enfoques a pequeña escala como la captación de agua de lluvia continúan recibiendo apoyo a nivel internacional (Cain, 2014).

El agua ha sido en más de una ocasión causa de conflictos, protestas y bloqueos. En este marco, la captación de agua de lluvia podría presentarse como la solución para sobreponerse a este escenario (Kumar et al., 2011).

2.1.3 Captación de agua de lluvia

Con el crecimiento de la población y el cambio del régimen climático, los sistemas de suministro de agua en muchas ciudades se encuentran amenazados. Para enfrentar este problema, las autoridades han adoptado diversas medidas que incluyen la gestión de la demanda y la identificación de fuentes alternas de agua como la captación de agua de lluvia, el reciclaje de aguas grises y negras y la desalinización. Entre todas las alternativas, quizá la captación de agua de lluvia sea la que ha atraído la mayor atención (Imteaz et al., 2011). A pesar de que la captación de agua de lluvia, combinada con la tecnología actual, promete grandes resultados, no es de ninguna forma una idea nueva: las comunidades indígenas de África y Asia han utilizado técnicas similares desde hace miles de años (Cain, 2014).

La captación de agua de lluvia no es únicamente una tecnología tradicional y funcional sino también es amigable con el ambiente (Pali, 2016). Sin embargo, requiere la interrupción de los ciclos naturales de la lluvia y su escurrimiento y el cambio de las

condiciones hídricas regionales. Es, en esencia, una perturbación ecológica artificial y, por lo tanto, tiene un impacto en el ambiente (Liu et al., 2015).

A pesar de todo, al realizar un balance, la captación de agua de lluvia es una alternativa sustentable y ampliamente aplicable para proveer de agua a las naciones, tanto en vías de desarrollo como industrializadas, y por tanto debería recibir mayor atención por parte de los gobiernos y las ONG's (Cain, 2014). En respuesta a esto, existen programas internacionales dedicados a financiar proyectos en países en vías de desarrollo enfocados en el manejo de los recursos hídricos en climas áridos y semiáridos. Estos programas han incrementado la atención y, por lo tanto, la disponibilidad de recursos en los proyectos de captación de agua de lluvia (Lasage and Verburg, 2015).

Desde 2008, en el plan para el manejo del agua de Jordania, se considera a la captación de agua de lluvia como una medida importante para reducir la demanda de agua y una fuente alternativa de agua para el uso doméstico y de irrigación (Assayed et al., 2013).

El agua de lluvia se encuentra libre de sales, así como de arsénico y es segura si se almacena higiénicamente. Las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua captada usualmente se empatan con aquellas deseadas para el agua potable. El agua captada puede ser usada no solo para beber sino que también puede ser utilizada para cocinar, lavar y bañarse (Biswas and Mandal, 2014). Por estas razones, la captación de agua de lluvia en tejados, carreteras y otras superficies artificiales puede convertirse en una fuente complementaria de agua para diversos fines (Al-Houri et al., 2014).

Sistemas de captación de agua de lluvia

Proveer de agua a las áreas urbanas presenta grandes retos debido a la escasez de agua, la infraestructura obsoleta y la incertidumbre frente al cambio climático, por esto, los RHS pueden incrementar el suministro de agua para abastecer las necesidades de las comunidades urbanas y rurales. Además el agua obtenida con los RHS es una alternativa económica durante los periodos secos, cuando el costo del agua potable es mayor o los sistemas de suministro de agua presentan grandes déficit (Lopes et al., 2017). Dichos periodos son también la mayor limitante de los sistemas, sin embargo pueden ser usados sin mayores dificultades si se almacena correctamente el agua captada (Biswas and Mandal, 2014). En consecuencia, los RHS han incrementado su

popularidad y aplicación en los últimos años como una fuente alternativa de agua en regiones áridas (DeBusk et al., 2013).

En zonas rurales y periurbanas donde no hay acceso a las fuentes comunes de agua, los RHS se convierten en una fuente de agua destinada a diversos propósitos, incluyendo beber, cocinar, lavar y riego. Por lo tanto, los RHS instalados en estas zonas deben tener una mayor confiabilidad (Hajani and Rahman, 2014). En estas comunidades, muchas familias utilizan el agua de lluvia captada para satisfacer una parte de su demanda sin evaluar antes la calidad de la misma. Sin embargo, existe cierto riesgo para la salud con estas prácticas, particularmente debido a la calidad del agua de lluvia y a las distintas formas en que ésta se capta, almacena, preserva y distribuye (Torres et al., 2013).

Dependiendo de las condiciones climáticas de un lugar, los RHS pueden presentarse como una fuente complementaria, una fuente alternativa e incluso como la única fuente factible de agua, especialmente en áreas urbanas (Kumar et al., 2011). El agua captada no debe ser considerada como un recurso gratuito ya que conlleva costos asociados con la inversión inicial, la operación y el mantenimiento (Roebuk et al., 2012). Es importante considerar los factores económicos porque los RHS se vuelven inoperables cuando no existe un balance costo-beneficio positivo. La implementación de políticas gubernamentales que promuevan la instalación de RHS puede volverlos más atractivos (Pelak and Porporato, 2016).

Una de las razones para la falta de investigación empírica sobre los aspectos hidrológicos y económicos de los RHS es la poca capacidad para generar los datos hidráulicos, hidrológicos y meteorológicos que influyen en la captación del agua. El problema radica principalmente en que el impacto en la naturaleza se genera a una escala micro y por lo tanto se dificulta la obtención de información de las fuentes convencionales (Kumar et al., 2006). Por esta razón uno de los asuntos más importantes es la necesidad de las herramientas apropiadas para proveer el mayor detalle posible al respecto de la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar RHS (Morales-Pinzón et al., 2015).

Junto con las limitaciones legales, el costo inicial, la aceptación social y la necesidad de tratamiento han sido algunos de los mayores obstáculos en la implementación de los RHS. Los estímulos más importantes para el uso de RHS como una fuente alternativa de

agua comúnmente están relacionados a la sustentabilidad, incluyendo la escasez de agua y el gran costo de la distribución de agua a nivel público (Matos Silva et al., 2015).

En Australia, las autoridades han promovido la instalación de RHS mediante campañas y ofreciendo incentivos y garantías para aquellas ideas e innovaciones concernientes al ahorro del agua (Imteaz et al., 2011). En consecuencia, el uso de tanques de almacenamiento de agua de lluvia se vuelve cada vez más común, tanto en las ciudades como en comunidades rurales y marginadas. Para enfrentar los meses de sequía que se presentan, en los últimos años se ha promovido la instalación de RHS a través de subsidios y otras medidas regulatorias, resaltando su importancia como una fuente alternativa de agua (Ahmed et al., 2010).

Los ejemplos más comunes corresponden al uso de sistemas de captación de agua de lluvia en escenarios de poca demanda de agua; en viviendas o negocios que no requieren de agua potable (Sanches-Fernandes et al., 2015).

Diseño de un sistema de captación de agua de lluvia

Un sistema de captación de agua de lluvia está dividido en cinco principales subsistemas, éstos son: (1) sistema de captación, (2) sistema de tratamiento, (3) sistema de almacenamiento, (4) sistema de distribución y (5) un sistema de alimentación alternativo (Vieira et al., 2014).

Para realizar correctamente el diseño de un RHS, hace falta un entendimiento profundo de la posible efectividad del mismo (Imteaz et al., 2011), al igual que información detallada sobre las lluvias de un lugar. En aquellas áreas que cuentan con información incompleta o nula, determinar el tamaño de la cisterna durante el diseño del RHS es sumamente difícil (Liaw and Chiang, 2014).

La configuración de un RHS puede variar ampliamente dependiendo de las características del edificio donde se va a instalar, la frecuencia e intensidad de la lluvia, el nivel de consumo de agua y la calidad requerida de la misma (Vieira et al., 2014).

La determinación de la capacidad de almacenamiento de la cisterna se lleva a cabo mediante reglas y lineamientos completamente genéricos, como la precipitación promedio y las características de la captación, que rara vez toman en cuenta todas las

variables involucradas (De Paola and Ranucci, 2012). Cada tipo de cisterna tiene diferentes reglas para su manejo, al mismo tiempo que varían en la forma en que descargan el agua; estas características tienen influencia sobre la eficiencia del sistema, tanto en términos de calidad del agua como del volumen de agua disponible para uso (De Paola and De Martino, 2013). De igual manera, es importante considerar que cuando la zona de demanda se encuentra cerca del tanque de almacenamiento, se requerirá menor inversión para la construcción (Angrill et al., 2017).

Generalmente, en climas templados, la disponibilidad de agua rebasa ampliamente a la demanda de la misma y por lo tanto dicha demanda puede ser satisfecha mediante el uso de RHS incluso cuando la cisterna sea considerablemente más pequeña (de 40 a 50%) del tamaño ideal calculado (Sanches-Fernandes et al., 2015).

Cuando en el diseño se consideran otras fuentes de agua además del agua de lluvia captada se puede tener una visión más completa de la utilidad y los beneficios de los RHS (Pelak and Porporato, 2016).

Captación de agua de lluvia en techos

En muchas partes del mundo, las prácticas de ahorro de agua en el hogar han ganado popularidad debido al crecimiento de la demanda de agua en las áreas urbanas. Algunas de estas prácticas involucran la instalación de sistemas capaces de reducir el consumo de agua, como retretes y regaderas ahorradoras y la puesta en marcha de programas de educación ambiental que ayuden a difundir el conocimiento de conceptos sobre la sustentabilidad hídrica entre la población (Campisano and Modica, 2012). Igualmente, existe una necesidad inmensa de una estrategia para el diseño óptimo de los sistemas hidráulicos para las viviendas, que involucre la captación de agua de lluvia y el reciclaje de aguas grises (García-Montoya et al., 2015).

En algunos lugares, el agua captada en los tejados de viviendas y comercios ha sido una forma práctica de suministrar agua de riego y, de manera parcial, satisfacer la demanda de agua potable. Tomando en cuenta que la mayor parte de las zonas urbanas se encuentran cubierta por tejados y otros materiales poco permeables, la captación de agua de lluvia tiene un gran potencial en las mismas. Además de servir como fuente de agua,

la captación del agua de lluvia en tanques previamente establecidos, podría reducir el número y la intensidad de las inundaciones (Mehrabadi et al., 2013).

Generalmente, el agua recolectada en los tejados no se encuentra muy contaminada y puede ser utilizada sin tratamiento para algunos fines: agua de retrete, en lavadoras, para riego, combatir incendios, limpieza, entre otros. En ocasiones, la implementación de los RHS a nivel doméstico e industrial no tiene el impacto esperado debido a la variación en la precipitación y a la dificultad para almacenar agua durante un largo periodo (Raimondi and Beccui, 2014).

La captación de agua de lluvia en los tejados de edificios puede ser considerada como un paso importante hacia la maximización de la disponibilidad de agua para uso doméstico y paisajístico (Al-Houri et al., 2014).

2.1.4 Generación estocástica de precipitación

Generación de información en base diaria

Establecer una distribución probabilística que refleje fielmente la cantidad de precipitación diaria ha sido siempre un tema de interés en los campos de la hidrología y la meteorología, entre otros. Las investigaciones sobre la distribución de la precipitación diaria se reparten en tres campos principales: modelos estocásticos de precipitación, el análisis de la frecuencia de la precipitación y el impacto del cambio climático global sobre la distribución de la precipitación (Hanson and Vogel, 2008).

Conservar las estadísticas clave sobre las temporadas húmedas y secas, y las cantidades de lluvia diaria y anual, es importante para la simulación estocástica de precipitación (Choudhury et al., 2017).

Los modelos para generar información en base diaria se pueden clasificar en cuatro grupos amplios: (1) Modelos en dos etapas, (2) Modelos de transición de la matriz de probabilidad, (3) Modelos de re muestreo y (4) Modelos en series de tiempo (Srikanthan and McMahon, 2001).

Modelos en dos etapas

Los modelos de precipitación diaria en dos etapas consisten básicamente en dos pasos: primero un modelo para generar los eventos secos y húmedos y segundo, un modelo

para asignar un valor de precipitación para cada uno de los eventos húmedos. Para una simulación confiable podría requerirse la inclusión de otros modelos y métodos de interpolación en ambos pasos con el fin de abarcar todas las posibles variaciones anuales, estacionales y diarias de la precipitación (Castellví et al., 2004).

La información concerniente al comportamiento de los periodos húmedos y secos es importante para el campo de la agricultura, la hidrología, la industria, los recursos naturales, etc. La lluvia modelada adecuadamente puede ser usada en la planeación agrícola, la gestión de las sequías, la predicción de inundaciones, la erosión del suelo y en estudios sobre cambio climático, así como otros campos relacionados (Sadiq, 2014).

Es importante resaltar que el diseño experimental para días continuos de lluvia se basa únicamente en la cantidad máxima de lluvia en esos días y no considera las relaciones probabilísticas entre el primer día de lluvia y la precipitación total en esos días (Wang et al., 2017). Por lo tanto, un paso clave en el análisis de la frecuencia de la precipitación involucra la selección de una distribución adecuada para representar la cantidad de precipitación con el fin de investigar los extremos (Hanson and Vogel, 2008).

Modelos de ocurrencia de eventos secos y húmedos

Existen dos tipos de modelos para determinar la ocurrencia de eventos secos y húmedos, el primer tipo es el basado en cadenas de Markov y el segundo en procesos de renovación alternados (Srikanthan and McMahon, 2001).

Las cadenas de Markov declaran cada día como “seco” o “húmedo”, estableciendo una relación entre los días anteriores y el día estudiado. El orden de la cadena se determina por el número de días precedentes que se toman en cuenta para determinar la probabilidad, siendo las más comunes aquellas de primer orden, es decir, las que toman en cuenta únicamente el día inmediato anterior (Srikanthan and McMahon, 2001).

Por su parte, los modelos de procesos de renovación alternados consideran los eventos secos y húmedos como periodos de dos o más días independientes uno del otro. Para la distribución de dichos periodos, los modelos utilizan series logarítmicas y otros métodos de distribución binomiales y geométricos. Sin embargo, las cadenas de Markov han

demostrado representar más fielmente la distribución de las lluvias (Srikanthan and McMahon, 2001).

Modelos para calcular el valor de la precipitación

Los modelos para cuantificar la precipitación incluyen dos modelos de distribución Gamma, modelos de distribución exponencial mixta y modelos de distribución Normal. Entre éstos, los modelos de distribución Normal han arrojado mejores resultados, sin embargo, se ha extendido el uso de los modelos de distribución Gamma debido a la simplicidad en su manejo (Srikanthan and McMahon, 2001).

Desafortunadamente, el uso de modelos de distribución Gamma, generalmente resulta en una subestimación de la cantidad de lluvia en simulaciones mensuales y multianuales. Con el fin de corregir esta subestimación se han desarrollado diversos métodos. Las principales propuestas para resolver este asunto incluyen (1) Modelos con distribución mixta, (2) Modelos de anidamiento, (3) Modelos con índices de correlación precipitación-clima y (4) Modelos que utilizan cadenas de Markov modificadas. En los modelos de distribución mixta, establecer una cantidad de precipitación como un valor extremo tiene marcadas debilidades. Los modelos de anidamiento utilizan factores empíricos de ajuste, generalmente sin fundamento físico. Los modelos que utilizan parámetros de cadenas de Markov modificadas cambian las probabilidades de transición entre periodos secos y húmedos para obtener variabilidad a largo plazo, pero usan la técnica de densidad de Kernel para calcular la cantidad de precipitación en los días húmedos utilizando datos existentes. Por lo tanto, normalmente no pueden generar valores extremos de precipitación mayores que los extremos previamente observados (Choudhury et al., 2017).

Adicionalmente, en ocasiones la información climática disponible está incompleta. Las deficiencias en la información pluvial pueden presentarse como fragmentos de información faltante debido a pluviómetros defectuosos, información obtenida en un periodo demasiado corto o información inexistente para el sitio de interés (Abas et al., 2014). En Uganda, por ejemplo, a falta de información completa con respecto a la precipitación debido a la reducción del número de pluviómetros a nivel nacional, en lugar de cadenas de Markov utilizaron modelos lineares generalizados (Kigobe et al., 2011).

Los modelos tipo Poisson como el Bartlett-Lewis han descrito de manera adecuada los procesos de precipitación en un rango amplio en la escala de tiempo en países como Reino Unido, Estados Unidos y Australia (Hanahish et al., 2011).

Por último, cabe señalar que la generación estocástica de información no es un sustituto para los modelos basados en datos físicos, sin embargo permite incluir la variabilidad de la precipitación en escalas en que los modelos físicos no pueden (Onofrio et al., 2014).

2.1.5 Cambio Climático

En años recientes se ha incrementado la preocupación con respecto al cambio climático causado por el aumento en la concentración de CO₂ y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera. Una de las consecuencias más graves podría ser la alteración de los ciclos hidrológicos y la disponibilidad de agua en ciertas regiones (Srikanthan and McMahon, 2001). El cambio en los regímenes de lluvia agrega complejidad a la planeación adecuada de los esquemas de captación de agua de lluvia (Imteaz et al., 2011).

Se espera que el cambio climático incremente la frecuencia e intensidad de las sequías, las temporadas secas y las inundaciones en regiones subtropicales (Dile et al., 2013). De esta forma, es necesario considerar el efecto del cambio climático en la planeación y el manejo de los recursos hídricos para asegurar un suministro adecuado (Mahmudul et al., 2016).

Para afrontar el problema, los estudios que involucran el efecto del cambio climático, involucran una variedad de escenarios. El ajuste de parámetros se puede llevar a cabo tanto en los datos históricos, de manera que se asemejen a los posibles datos que ocurrirán en el futuro, como en el modelo mismo, adaptando los parámetros al asumir un escenario futuro (Srikanthan and McMahon, 2001).

2.1.6 Agricultura de traspatio

A pesar de que el número y la proporción de personas que sufren hambre se estima ha disminuido, aún existen mil millones de personas con cierto grado de desnutrición, la mayoría de ellas viven en áreas rurales en países en vías de desarrollo. La FAO estima

que incluso si se duplica la producción de alimentos en el mundo, para el 2050 una de cada veinte personas estará en riesgo de desnutrición (Dile et al., 2013).

Tomando en cuenta que la productividad agrícola en función del agua sigue siendo deficiente, es fácil inferir que se requerirán grandes volúmenes de agua para satisfacer las necesidades alimenticias de la creciente población rural, por esto, la captación de agua de lluvia para agricultura de traspatio se presenta llena de posibilidades (Baiyegunhi, 2015).

Agricultura de traspatio se refiere a la producción en el hogar de vegetales, tubérculos, frutas y otras especies de plantas comestibles, con el objetivo primordial de ser consumidos en el mismo hogar (Gopi et al., 2016).

Las mujeres juegan un papel importante para la agricultura en las zonas rurales y periurbanas. Por lo tanto, al ser ellas quienes acarrear el agua, en ocasiones durante horas, para satisfacer las necesidades del hogar, se pierde una parte significativa de la fuerza laboral. Otro factor importante a considerar es la pérdida de oportunidades de estudio para las niñas, que en ocasiones acarrear agua en lugar de asistir a la escuela (Moore and Mclean, 2008).

2.2 LITERATURA CITADA

- Abas, N., Daud, Z. and Yosuf, F. 2014. A comparative study of mixed exponential and Weibull distributions in a stochastic model replicating a tropical rainfall process. *Theoretical Applied Climatology* 118:597-607.
- Abdulla, F. and Al-Shareef, A. W. 2009. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination* 243:195-207.
- Ahmed, W., Goonetilleke, A. and Gardner, T. 2010. Implications of faecal indicator bacteria for the microbiological assessment of roof-harvested rainwater quality in southeast Queensland, Australia. *Canadian Journal of Microbiology* 56: 471-479.
- Al-Houri, Z., Abu-Hadba, O. and Hamdan, K. 2014. The Potential of Roof Top Rain Water Harvesting as a Water Resource in Jordan: Featuring Two Application Case Studies *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* 8:147-153.
- Angrill, S., Segura-Castillo, L., Petit-Boix, A., Rieradevall, J., Gabarrell, X. and Josa, A. 2017. Environmental performance of rainwater harvesting strategies in Mediterranean buildings. *International Journal of Life Cycle Assess* 22:398-409.
- Assayed, A., Hatokay, Z., Al-Zoubi, R., Azzam, S., Qbailat, M., Al-Ulayyan, A., Saleem, M., Bushnaq, S. and Maroni, R. 2013. On-site rainwater harvesting to achieve household water security among rural and peri-urban communities in Jordan. *Resources, Conservation and Recycling* 73:72-77.

- Baiyegunhi, L. 2015. Determinants of rainwater harvesting technology (RWHT) adoption for home gardening in Msinga, KwaZulu-Natal, South Africa. *Water SA* 41:33-39.
- Bezzina, F. and Scicluna, I. 2016. Exploring rainwater harvesting opportunities in Malta. *Management of Environmental Quality: An International Journal* 27:390-406.
- Biswas, B. and Mandal, B. 2014. Construction and evaluation of rainwater harvesting system for domestic use in a remote and rural area of Khulna, Bangladesh. *International Scholarly Research Notices* 2014:1-6.
- Cain, N. 2014. A Different Path: The Global Water Crisis and Rainwater Harvesting. *Consilience: The Journal of Sustainable Development* 12:147-157.
- Campisano, A. and Modica, C. 2012. Optimal sizing of storage tanks for domestic rainwater harvesting in Sicily. *Resources, Conservation and Recycling* 63:9-16.
- Castellví, F., Mormeneo, I. and Pérez, P. 2004. Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: A case study from Argentina. *Journal of Hydrology* 289:268-302.
- Choudhury, K., Lockart, N., Willgoose, G., Kuckera, G., Kiem, A. and Manage, N. 2017. Development and evaluation of a stochastic daily rainfall model with long term variability. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 1-30.
- De Paola, F. and Ranucci, A. 2012. Analysis of spatial variability for stormwater capture tank assessment. *Irrigation and Drainage* 61:682-690.
- De Paola, F. and De Martino, F. 2013. Stormwater tank performance: design and management criteria for capture tanks using a continuous simulation and semi-probabilistic analytical approach. *Water* 5:1699-1711.
- DeBusk, K., W., H. and Wright, J. 2013. Characterizing rainwater harvesting performance and demonstrating stormwater management benefits in the humid southeast USA. *Journal of the American Water Resources Association* 49:1398-1411.
- Dile, Y., Karlberg, L., Temesgen, M. and Rockström, J. 2013. The role of water harvesting to achieve sustainable agricultural intensification and resilience against water related shocks in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 181:69-79.
- Doss-Gollin, J., de Sousa F, F. and Eneas S, F. 2016. Analytic modeling of rainwater harvesting in the brazilian semiarid northeast. *Journal of the American Water Resources Association* 52:129-137.
- Dwivedi, A., Patil, V. and Karankal, A. 2013. Rooftop rain water harvesting for groundwater recharge in educational complex. *Global Journal of Researches in Engineering* 13:21-30.
- García-Montoya, M., Bocanegra-Martínez, A., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M. and M., E.-H.-. 2015. Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers and Chemical Engineering* 76:104-116.
- Gopi, G., Arunraj, R. and Rajees, P. 2016. Impacts of Home Gardening in Agrobiodiversity Hotspots among Small and Marginal Farm Households. *Madras Agricultural Journal* 103:187-191.
- Hajani, E. and Rahman, A. 2014. Reliability analysis for rainwater harvesting system in peri-urban regions of greater Sydney, Australia. *Water* 6:945-960.
- Hanahish, I., Ibrahim, K. and Jemain, A. 2011. Stochastic modelling of rainfall in peninsular Malaysia using Bartlett Lewis rectangular pulses models. *Modelling and Simulation in Engineering* 2011:1-6.

- Hanson, L. and Vogel, R. 2008. The probability distribution of daily rainfall in the United States. World Environmental and Water Resources. Honolulu, Hawaii, United States
- Helmreich, B. and Horn, H. 2009. Opportunities on rainwater harvesting. Desalination 248:118-124.
- Imteaz, M., Ahsan, A., Naser, J. and Rahman, A. 2011. Reliability analysis of rainwater tanks in Melbourne using daily water balance model. Resources, Conservation and Recycling 56:80-86.
- Kigobe, M., McIntyer, N., Wheeler, H. and Chandler, R. 2011. Multi-site stochastic modelling of daily in Uganda. Hydrological Sciences Journal 56:17-33.
- Kumar, M., Ghosh, S., Patel, A., Singh, O. and Ravindranath, R. 2006. Rainwater harvesting in India: some critical issues for basin planning and research. Land Use and Water Resources Research 6:1-17.
- Kumar, M., Patel, A. and Singh, O. 2008. Rainwater Harvesting in the Water-scarce Regions of India: Potential and Pitfalls. Land Use and Water Resources Research 6:289-314.
- Kumar, R., Thaman, S., Agrawal, G. and Sharma, P. 2011. Rain Water Harvesting and Ground Water Recharging in North Western Himalayan Region for Sustainable Agricultural Productivity. Universal Journal of Environmental Research and Technology 1:539-544.
- Lasage, R. and Verburg, P. 2015. Evaluation of small scale water harvesting techniques for semi-arid environments. Journal of Arid Environments 118:48-57.
- Liaw, C. and Chiang, Y. 2014. Dimensionless analysis for designing domestic rainwater harvesting systems at the regional level in northern Taiwan. Water 6:3913-3933.
- Liu, Y., Liang, C., Ye, C. and Xiang, J. 2015. Ecological analysis of disturbance and disturbance intensity estimates for rainwater harvesting. Polish Journal of Environmental Studies 24:1153-1158.
- Londra, P. A., Theocharis, A. T., Baltas, E. and Tsihrintzis, V. A. 2015. Optimal Sizing of Rainwater Harvesting Tanks for Domestic Use in Greece. Water Resource Management 29:4357-4377.
- Lopes, V., Fernandes, G., Dornelles, F. and Medellin-Azuara, J. 2017. Performance of rainwater harvesting systems under scenarios of non-potable water demand and roof area typologies using a stochastic approach. Journal of Cleaner Production 148:304-313.
- Mahmudul, M., Rahman, A. and Samali, B. 2016. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. Journal of Cleaner Production 137:60-69.
- Matos Silva, C., Sousa, V. and Vaz Carvalho, N. 2015. Evaluation of rainwater harvesting in Portugal: Application to single-family residences. Resources, Conservation and Recycling 94:21-34.
- Mehrabadi, M., Saghafian, B. and Fashi, F. 2013. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. Resources, Conservation and Recycling 73:86-93.
- Moore, D. and Mclean, S. 2008. Appraisal of the requirements for establishing domestic roof rainwater harvesting schemes in Bangladesh. Journal of Building Appraisal 4:23-31.

- Morales-Pinzón, T., Rieradevall, J., Gasol, C. and Gabarrell, X. 2015. Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems. *Journal of Cleaner Production* 87:613-626.
- Onofrio, D., Palazzi, E., von Hardenberg, J., Provenzale, A. and Calmanti, S. 2014. Stochastic rainfall downscaling of climate models. *Journal of Hydrometeorology* 15:830-843.
- Pali, A. K. 2016. Design Considerations and Economics of Water Harvesting System for Crop Production. *Journal of the Institution of Engineers (India)* 97:155-161.
- Pawar, C., Patil, S. and Pawar, R. 2014. A case study of rooftop rainwater harvesting of Renavi village in Sangli District of Western Maharashtra: New approach of watershed development in India. *African Journal of Agricultural Research* 9:1941-1947.
- Pelak, N. and Porporato, A. 2016. Sizing a rainwater harvesting cistern by minimizing costs. *Journal of Hydrology* 541:1340-1347.
- Raimondi, A. and Beccui, G. 2014. Probabilistic modeling of rainwater tanks. *Procedia Engineering* 89:1493-1499.
- Roebuk, R., Oltean-Dumbrava, C. and Tait, S. 2012. Can simplified design methods for domestic rainwater harvesting systems produce realistic water-saving and financial predictions? *Water and Environmental Journal* 26:352-360.
- Sadiq, N. 2014. Stochastic modelling of the daily rainfall frequency and amount. *Arabian Journal for Science and Engineering* 39:5691-5702.
- Sanches-Fernandes, L., Terencio, D. and Pacheco, F. 2015. Rainwater Harvesting Systems for Low Demanding Applications. *Science of the total environment* 529:91-100.
- Shittu, O., Okareh, O. and Coker, A. 2015. Development of rainwater harvesting technology for securing domestic water supply in Ibadan, Nigeria. *International Research Journal of Engineering Science, Technology and Innovation* 4:32-37.
- Srikanthan, R. and McMahon, T. 2001. Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. *Hydrology and Earth System Sciences* 5653-670.
- Torres, A., Méndez-Fajardo, S., Gutiérrez, A. and Sandoval, S. 2013. Quality of rainwater runoff on roofs and its relation to uses and rain characteristics in the Villa Alexandra and Acacias neighbourhoods of Kennedy, Bogota, Colombia. *Journal of Environmental Engineering* 139:1273-1278.
- van der Sterren, M., Rahman, A. and Dennis, G. R. 2013. Quality and Quantity Monitoring of Five Rainwater Tanks in Western Sydney, Australia. *Journal of Environmental Engineering* 139:332-340.
- Vieira, A., Beal, C., Ghisi, E. and Stewart, R. 2014. Energy intensity of rainwater harvesting systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 34:225-242.
- Wang, Y., Li, C., Yu, F., Qiu, Q., Tian, J. and Zhang, M. 2017. Multivariate analysis of joint probability of different rainfall frequencies based on copulas. *Water* 1981-16.

3. CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE TECHUMBRES EN COMUNIDADES RURALES MARGINADAS CON FINES DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA HYDRODYNAMIC CHARACTERIZATION OF ROOFS IN MARGINAL RURAL COMMUNITIES FOR WATER HARVESTING PURPOSES

3.1 RESUMEN

En zonas rurales marginales de las zonas áridas de México es de crucial importancia el abasto de agua para las necesidades básicas de los pobladores. La captación de agua de lluvia de los techos de las viviendas es una alternativa viable para una mayor disposición de recursos hídricos. El objetivo del presente trabajo fue hacer una caracterización del uso del agua y de la hidrodinámica de las techumbres de una muestra de municipalidades del norte árido del país con el propósito de identificar la viabilidad y el potencial de los sistemas de captación de agua de lluvia fines domésticos y productivos en traspatio. Se identificaron tres tipos de materiales de techumbre: lámina galvanizada, tierra y cemento. El estado de superficie se caracterizó en buena y mala condición. Se diseñó y utilizó un simulador de lluvia para cuantificar la hidrodinámica de las techumbres de las viviendas. El tipo de techo de lámina en buena condición fue el de mayor potencialidad con un coeficiente de escurrimiento (CE) de 0.99; el mismo material en malas condiciones reduce su valor al 59%. El techo de tierra fue el de menos potencialidad de escurrimiento, el cual se redujo en un 100%. El 71% de las viviendas muestreadas tienen techumbres de tierra por lo que la captación de agua de lluvia es mínima o nula. Es necesario ubicar un área para el proceso de captación de agua de lluvia donde el coeficiente de escurrimiento sea superior al 50% dadas las características reducidas de precipitación pluvial existentes en zonas áridas o bien adecuar las techumbres existentes.

Palabras clave: escurrimiento hídrico, precipitación pluvial, simulación de lluvia, agricultura familiar, zonas áridas.

3.2 ABSTRACT

In dryland marginal rural communities in Mexico is a crucial matter to supply water for the basic needs of inhabitants. Roof rainwater harvesting in households is an alternative full of possibilities. The objective of this work was to characterize the water use and the roof hydrodynamic in a sample of communities in the arid northern Mexico aiming to identify the viability of rainwater harvesting systems for human consumption and backyard agriculture. Three roof types were found: galvanized sheet, soil and cement. These roof types were classified in good and bad conditions. A rain simulator was designed and used to quantify the households' rooftops hydrodynamic. The roof type with the greatest runoff was the good galvanized sheet in good conditions (RC = 0.99), where almost all of the

water becomes runoff; the same material in bad conditions reduces its value to 59%. The material which produces least runoff was the soil, which in some cases produced none runoff. Seventy one percent of the sampled households have soil roofs which threatens rainwater harvesting. It's necessary to identify areas where the runoff coefficient is higher than 0.5 due to the dryland pluviometry or to change the existing rooftop conditions in order to harvest rainwater.

Keywords: runoff, rainfall, rain simulation, backyard agriculture, drylands.

3.3INTRODUCCIÓN

El agua constituye una necesidad vital para el desarrollo integral de la sociedad. Sin embargo, es un recurso escaso tanto en cantidad como calidad (PNUD, 2006). La situación de disponibilidad es agravado por la incertidumbre climática específicamente por el cambio en los patrones del clima (Sánchez Cohen et al 2011). Así, se ha documentado el impacto de la variabilidad climática y la consecuente disponibilidad de agua, inducida por patrones globales de clima sobre la agricultura y otros usos (Sánchez Cohen et al 2018).

La Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés), clasifica a las tierras secas de acuerdo con su índice de aridez en áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Utilizando este criterio, se estimó que las tierras secas de México ocupan aproximadamente 101.5 millones de hectáreas, poco más de la mitad del territorio. De esta superficie, las zonas áridas representan el 15.7%, las semiáridas el 58% y el 26.3% restante corresponde a las zonas subhúmedas secas (UACH, 2011). Es en estas zonas donde habita el 30% de la población de México (INEGI, 2010).

En México, casi una tercera parte de las viviendas localizadas en comunidades rurales con población menor a los 2,500 habitantes carecen de agua potable, y más de 63% no cuenta con servicios de alcantarillado o saneamiento básico (CONAGUA, 2010). Ante este panorama una alternativa para el abastecimiento de agua para consumo humano y otras actividades como agricultura de traspatio lo constituye la captación de agua de lluvia (Critchley y Sieger, 1991).

En zonas rurales marginadas las techumbres de las casas se constituyen en fuente de captación de volúmenes de precipitación pluvial sin inversión cuantiosa. Bajo estas condiciones solo es necesario contar con un área de almacenamiento del volumen colectado y quizá la adecuación de las condiciones del techo. La calidad del agua almacenada definirá el uso potencial; así, si el agua es de buena calidad entonces será apta para consumo humano. Si por el contrario el material de la techumbre u otra circunstancia no permiten contar con agua potable, entonces podrá ser usada para agricultura de traspatio u otra actividad que no comprometa la salud humana. Es posible también el tratamiento bioquímico del agua colectada para elevar su calidad.

El tipo de techumbre define la eficiencia de la captación del agua de lluvia. Esta eficiencia puede ser cuantificada mediante un coeficiente de escurrimiento (CE) que indica la porción de la lluvia total que se convierte en escurrimiento. El CE es definido como una cantidad adimensional que relaciona la cantidad de escurrimiento con la cantidad de precipitación; su valor es mayor en áreas lisas impermeables (Khosravi et al 2013). Si bien es cierto que existe en la literatura valores para el CE para diferentes materiales, estos comúnmente son obtenidos para condiciones buenas de techumbres en países con economías que permiten mantener un adecuado estado de los techos (Mobilia et al 2014).

La cuantificación precisa del CE requiere de mediciones directas sobre los materiales (techos) que producirán el escurrimiento. Bajo condiciones de baja precipitación pluvial es deseable que el CE sea lo más alto posible. En esta tesitura, la simulación de lluvia (lluvia controlada) ofrece la mejor opción ya que se pueden inducir diferentes intensidades duraciones y frecuencias de precipitación pluvial bajo las condiciones reales de las superficies de las techumbres. El objetivo del presente estudio fue identificar los usos del agua y caracterizar hidrodinámicamente los techos de las casas de comunidades rurales de zonas áridas, con la finalidad de cuantificar su potencialidad para producir escurrimiento con fines de captación de agua de lluvia para consumo humano y agricultura de traspatio.

3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en los municipios de Mapimí y Tlahualilo del estado de Durango, México. El Cuadro 1 detalla las comunidades involucradas en cada municipio y su ubicación geográfica.

Para mayor especificidad de los procedimientos utilizados en el trabajo, éste se divide en dos fases: 1 Fase de Laboratorio y 2 Fase Experimental

3.4.1 Fase de laboratorio

Con la finalidad de caracterizar la potencialidad de los techos de casas en comunidades rurales para la producción de escurrimiento, se diseñó un simulador de lluvia para inducir precipitación de forma controlada en los diferentes materiales que conforman los techos de las casas de comunidades rurales de zonas áridas.

El simulador de lluvia consta de un aspersor tipo *Rain Bird*® serie 10 VAN el cual es alimentado por una tubería de media pulgada de diámetro teniendo una carga hidráulica de operación de 15 PSI (libras por pulgada cuadrada equivalente a 10.55 m de columna de agua o 103.42 kPa)



Figura 1 Simulador de lluvia en el proceso de calibración

Este aspersor puede emitir agua a diferentes ángulos lo cual le da la peculiaridad de ajustarse a las diferentes geometrías de los techos a las que se les aplicaría el agua de lluvia. El sistema hidráulico es presurizado mediante una bomba de 1 HP (caballo) a la que se le provee de energía mediante una planta de luz a base de gasolina. La planta de luz tiene capacidad de 120 watts de potencia.



Figura 2 Manifold para controlar la presión de operación del simulador de lluvia (izq) y planta de luz como fuente de energía (der). La carga de operación del aspersor fue de 15 PSI.

El proceso de calibración del simulador incluyó la cuantificación de la uniformidad de aplicación del agua del aspersor; para esto, se diseñó una cuadrícula de 5 x 5 m en un lugar cerrado para evitar influencia del viento que pudiera distorsionar el patrón de humedecimiento, instalando un pluviómetro en los vértices a cada metro en donde se recolectó el agua de lluvia de un periodo de 5 min. El aspersor quedó instalado justo en el centroide de la cuadrícula. El coeficiente de uniformidad del aspersor (CU) se calculó mediante la ecuación: (Christiansen, 1942)

$$CU = 100 * \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - M|}{M * n} \right) 1$$

Donde “n” es el número de pluviómetros, “x” es el volumen recolectado en cada pluviómetro (i), “M” es el volumen medio recolectado de todos los pluviómetros

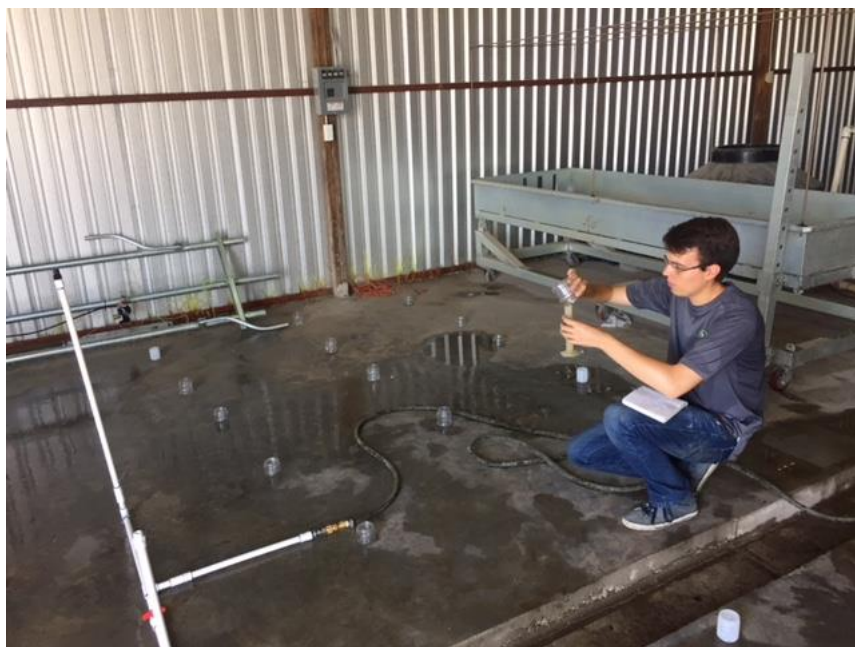


Figura 3 Proceso de recolección de los volúmenes de cada pluviómetro.

3.4.2 Fase experimental

Con el propósito de conocer las necesidades de adecuación de los techos para la captación de agua de lluvia, se identificaron los tipos de usos de agua por las familias en las comunidades del área de estudio.

En la fase experimental se realizaron simulaciones de lluvia en diferentes techumbres de las comunidades muestreadas. Los tipos de techumbre fueron: techo de cemento, de tierra y de lámina. Para cada caso los techos se categorizaron en bueno y mal estado. El criterio para categorizar el estado de las techumbres como bueno, fue con base en las siguientes características:

- Si presenta o no grietas
- Presenta o carece de desniveles contrastantes
- El estado del techo es homogéneo o irregular

Esta última característica se refiere a que la condición del techo es buena en la mayor parte del área no apareciendo diferentes condiciones en el mismo techo. También se

consideró que el área del techo no estuviera ocupada por cables, basura, desechos como llantas, maderas, latas, etc.

La elección de los tipos de techumbre se derivó de una serie de encuestas en las comunidades rurales de donde resultó que el mayor porcentaje de viviendas contaban con ese tipo de materiales en sus techos. La relación de las comunidades muestreadas aparece en el cuadro 1. Los usos generales del agua se muestran en la Figura 4. Los esquemas de diseño de sistemas de captación de agua de lluvia deberán considerar el balance de agua (relación entre precipitación pluvial y consumo), para lo cual es necesario la caracterización hidrodinámica de las techumbres de las casas.

Cuadro 1 Localidades incluidas en el muestreo para la caracterización del tipo de techumbre.

Comunidad	Ubicación	Número de encuestas
La Victoria	25°52'52" N 103°35'38" W	2
Roma Texas	25°51'59.67' N 103°43'30.67 W	4
Nombre de Dios	25°58'36.46" N 103°39'23.33" W	9
La Sierrita	25°57'58" N 103°38'44" W	10
Fco. Montes de Oca	25°51'48.00" N 103°35'25.83" W	11
San José de Bellavista	25°52'08.23" N 103°42'46.71" W	11
Bermejillo	25°53'18.39" N 103°37'17.18" W	19



Figura 4. Características de las comunidades muestreadas en relación al uso del agua y el tipo de techo

En cuanto al material de los techos, el 71% está hecho de tierra, el 27% de cemento y únicamente el 2% está construido con lámina. El 62% de las casas encuestadas practica la agricultura de traspatio.

Para el proceso de simulación de lluvia, el simulador se instaló en el techo de la vivienda induciendo lluvia con una intensidad de entre 48 y 76 mm h⁻¹. Este rango de intensidad corresponde a un periodo de retorno de 10 años para las localidades consideradas en el estudio. La Figura 6 muestra los climogramas con datos históricos de las dos municipalidades consideradas en el estudio.

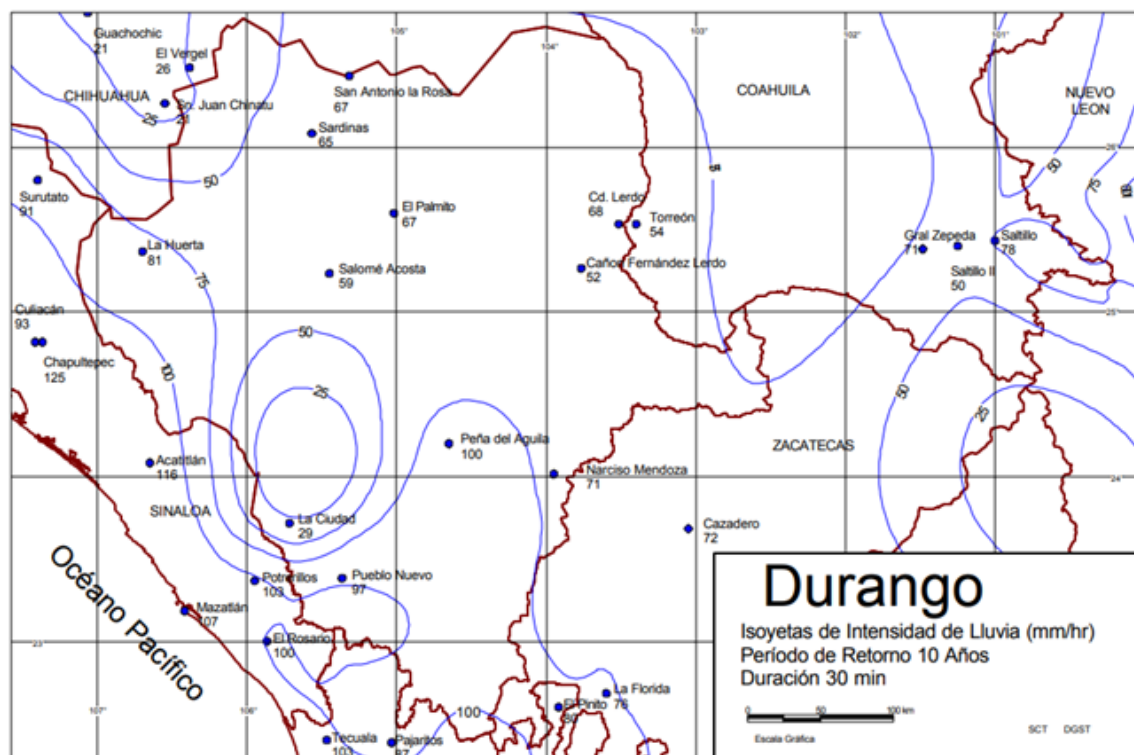


Figura 5 Curvas de intensidad de lluvia-duración-frecuencia para un periodo de retorno de 10 años para el estado de Durango (disponible en: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>)

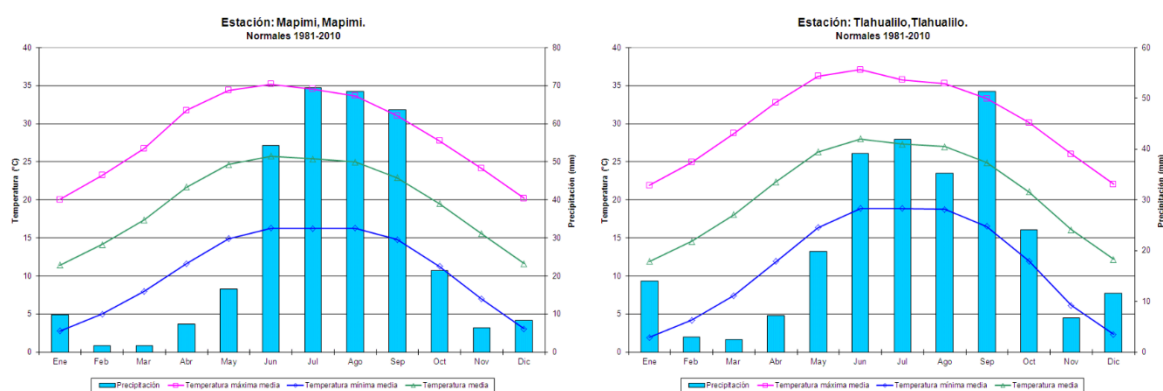


Figura 6 Climogramas para las municipalidades de Mapimí (izquierda) y Tlahualilo (derecha) en el estado de Durango.

El cálculo del coeficiente de escurrimiento involucró la siguiente metodología:

1. Conocer el volumen de agua que se dispensa por unidad de tiempo (intensidad de lluvia conocida previamente mediante el proceso de calibración del simulador de lluvia)
2. Limpiar el área de prueba en el techo garantizando que las salidas no estén tapadas
3. Iniciar la simulación de lluvia anotando el tiempo de inicio
4. Anotar el tiempo en que se inicia el movimiento de agua sobre el techo
5. Anotar el tiempo en que se inicia la recolección del escurrimiento
6. Anotar el volumen de escurrimiento



Figura 7 Tiempo de inicio del escurrimiento (izquierda) y medición del volumen recolectado (derecha).

El coeficiente de escurrimiento (CE) se obtuvo como:

$$CE = \frac{Q}{P} \quad 2$$

Donde Q es volumen o lámina de agua captada (aforada) y P es el volumen o lámina de lluvia inducida.

El tiempo que pasa desde el inicio de la simulación de lluvia hasta el inicio del escurrimiento se constituye en el volumen de agua necesaria para que el material del techo se sature y pueda iniciar el escurrimiento; a este valor se le conoce como valor frontera (TSH) y se obtiene como:

$$TSH = I * \frac{Tq - Tin}{60} \quad 3$$

Donde “I” es la intensidad de lluvia simulada, “Tin” es el tiempo de inicio de la lluvia, “Tq” es el tiempo de inicio del escurrimiento.

3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del proceso de calibración resultó la relación carga-gasto del aspersor, con ecuación de regresión cuadrática y lineal negativa y un ajuste de los datos al modelo utilizado de $R^2 = 0.98$ (Figura 8)

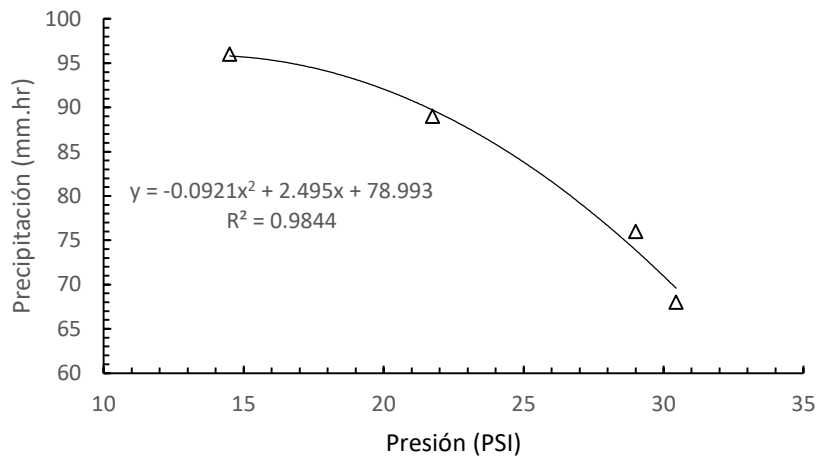


Figura 8 Relación presión-tasa de lluvia (mm.hr⁻¹). Nótese que a 30 PSI de presión, el gasto aproximado del aspersor es 70 mm.hr⁻¹

Cuadro 2 Coeficientes de escurrimiento para las diferentes tipos de techumbre muestreadas.

	Tipo de techo					
	Techo de tierra		Techo de Lámina Galvanizada		Techo de cemento	
	Buenas condiciones	Malas condiciones	Buenas condiciones	Malas condiciones	Buenas condiciones	Malas condiciones
C.E. Promedio	0.063	0.0146	0.995	0.595	0.233	0.158
Desv. Est.	0.029	0.0043	0.0052	0.034	0.032	0.081

Cuadro 3 Precipitación antecedente necesaria para iniciar el escurrimiento acorde a la ecuación No. 3.

	Tipo de techo					
	Techo de tierra		Techo de lámina galvanizada		Techo de cemento	
	Buenas condiciones	Malas condiciones	Buenas condiciones	Malas condiciones	Buenas condiciones	Malas condiciones
Tsh promedio(mm)	1.0738	1.6465	0.0614	0.1361	0.4412	0.6337
Desv. Est.	0.1506	0.1772	0.0074	0.0041	0.0240	0.3857

Martínez (2006) indica valores de coeficiente de escurrimiento para cemento de 0.83 para un periodo de retorno de 10 años. Así mismo, los valores de coeficiente de escurrimiento para un camino de tierra, que podría ser similar a la tierra apisonada usada en un techo de vivienda, varían entre 0.29 y 0.65, dependiendo del grupo hidrológico del suelo para una tormenta de 80 mm.

Por su parte, Carpenter y Kaluvakolanu (2011) llevaron a cabo un estudio en techos de asfalto, de piedra y vegetados (techos verdes), donde obtuvo valores de 0.917, 0.559 y 0.591 respectivamente para tormentas grandes. Así mismo los valores de desviación estándar para los casos fueron de 0.923, 0.191 y 0.669 respectivamente. En tanto, Biswas y Mandal (2014) establecieron coeficientes de escurrimiento superiores al 0.9 para lámina galvanizada y de entre 0.6 y 0.8 para concreto.

Tomando esto en cuenta, podemos observar que el único valor comparable con los resultados del presente estudio es el de la lámina galvanizada, sin embargo, esta afirmación es cierta únicamente para techos de este material que se encuentren en buen estado. El resto de los valores se encuentran por debajo de lo reportado en la literatura, y para el caso de techos de tierra, no se encontró literatura que reportara esos valores específicos.

Debido al estado de superficie de los materiales de los techos muestreados, la cantidad de lluvia necesaria para el inicio de escurrimiento es diferencial para cada tipo de techo y constituye un valor que se tendrá que considerar en el diseño de las obras de captación de agua de lluvia, debido a que ésta, cuando es de poca cuantía, no producirán el escurrimiento esperado. Esto puede ser una variable de importancia para decidir si una vivienda tiene potencialidad o no para el proceso de captación de agua de lluvia.



Figura 9 Diferentes techumbres evaluadas y su condición. Izquierda en buena condición y derecha en mala condición. Arriba cemento, en medio tierra y abajo lámina galvanizada.

Similar a lo reportado por Fassman *et al* (2016), el CE es afectado por la intensidad de lluvia; así, en este estudio mientras más alta la intensidad el CE se reduce debido a que al incrementar la presión de operación del aspersor para modificar la intensidad, la gota se atomiza provocando que tenga que transcurrir más tiempo para el inicio del escurrimiento (Figuras 8 y 10).

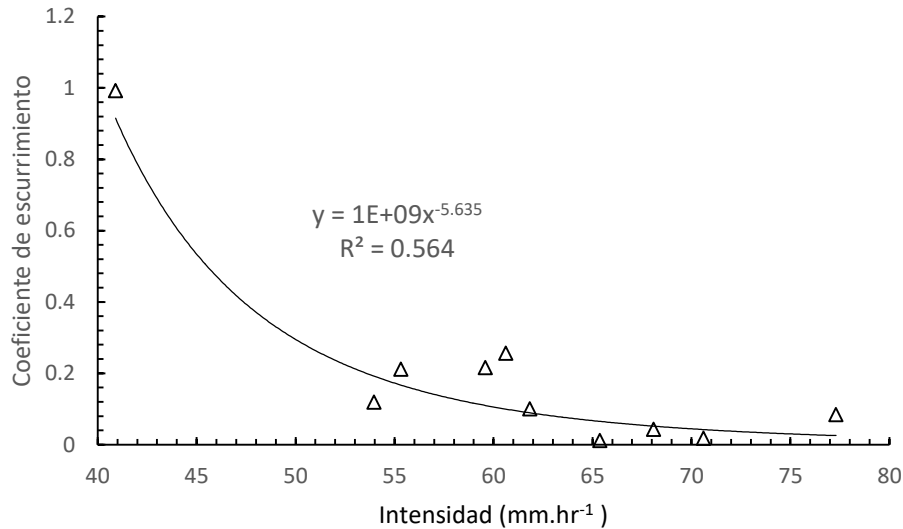


Figura 10 Dependencia del coeficiente de escurrimiento (CE) con la intensidad de lluvia.

3.6 CONCLUSIONES

El material con menos potencialidad de escurrimiento fue el techo de tierra mismo que, en algunas pruebas, no presentó escurrimiento, bajo las condiciones en que se realizó este estudio. Adicionalmente, bajo estas condiciones de techumbre y volúmenes de lluvia probados, no se obtendrían las cantidades de agua para satisfacer las necesidades de la vivienda.

Acorde a la climatología histórica del sitio de estudio, las precipitaciones pluviales son de bajo volumen, lo que reduce la posibilidad de obtener cantidades adicionales de agua para las diferentes necesidades domésticas y productivas a nivel familiar.

El simulador de lluvia diseñado para la obtención de éste parámetro resultó ser una herramienta sencilla y fácil de operar, además de no ser costosa, para la adecuada obtención de información en campo.

3.7 LITERATURA CITADA

- Christiansen, J. E. 1942. Irrigation by Sprinkling. Bullet 670. University of California. Agricultural Experimental Station. Berkeley, California. 124 p.
- CONAGUA. 2010. Estadísticas del agua en México, edición 2010, México D. F., SEMARNAT.
- Critchley W and K. Siegert. 1991. Water Harvesting. A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production. Food and Agriculture Organization of the United Nations – Rome.
- Fassman-Beck E. W, Hunt, R. Berghage, D. Carpenter, T. Kurtz, V. Stovin and B. Wadzuk. 2016. Curve Number and Runoff Coefficients for Extensive Living Roofs. Journal of Hydrologic Engineering. Vol 21 No. 3.
- INEGI. 2011. Censo de Población y Vivienda 2010. México.
- Khosravi K. H. Mirzai and I. Saleh. 2013. Assessment of Empirical Methods of Runoff Estimation by Statistical test (Case study: BanadakSadat Watershed, Yazd Province). International journal of Advanced Biological and Biomedical Research Vol. 1, No. 3, Pp 285-301
- Lancaster, B. 2013. Rainwater harvesting for Drylands and beyond. Volume 1. Rainsource Press. Tucson Az. 280 pp.
- Mobilia, M., A. Longobardi and J. Friedrich Sartor. 2014. Impact of green roofs on stormwater runoff coefficients in a Mediterranean urban environment. Recent Advances in Urban Planning, Sustainable Development and Green Energy.
- Pérez-Rodríguez, R., Marqués, M.J., Jiménez, L., García-Ormaechea, S. and Bienes, R. 2014. Rainfall Simulation Over Different Dimensions of Experimental Erosion Plots: Intensity, Drop Size, Drop Velocity And Kinetic Energy. Disponible en: <file:///C:/Users/Ignacio%20Sanchez/Downloads/RAINFALLSIMULATIONOVERDIFFERENTDIMENSIONSOFFEXPERIMENTALEROSIONPLOTS.pdf>
- Pérez R., L. Jiménez, P. García-Estríngana, M.J. Marqués, M. Chicharro, S. González, J. Alegre, and R. Bienes. 2003. Calibración De Un Simulador De Lluvia Para Estudios De Degradación Del Suelo. Edafologia, Vol. 10 (2), pp. 247-254
- PNUD. 2006. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe sobre Desarrollo Humano. New York. E.U.A.
- Sánchez Cohen, I. G. Díaz Padilla, T. Vavazos Pérez, G. R. Granados Ramírez y Eugenio Gómez Reyes. 2011. Elementos para Entender el Cambio Climático y sus Impactos. Editorial Porrúa. Mexico. 176 pp.
- Sanchez Cohen I., M.A. Inzunza Ibarra, G. Esquivel Arriaga, J. Cerano Paredes, M.A. Velasquez Valle and P. Bueno Hurtado. 2018. The impact of climatic patterns on runoff and irrigation water allocation in an arid watershed of northern Mexico. J. Meteorology, Hydrology and Water Management. Vol. 6 No. 2. Pp 1 - 8.

- Water Resources Control Board. 2011. The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State 5.1.3 FS-(RC) 2011. Disponible en: <http://water.me.vccs.edu/courses/CIV246/table2b.htm>
- UACH. 2011. *Actualización de la delimitación de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas de México, a escala regional. Reporte final de proyecto de investigación*. Universidad Autónoma Chapingo. México.

4. CAPÍTULO III

APOYO COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA EN ÁREAS RURALES DE MÉXICO

COMPUTER AID FOR ROOF WATER HARVESTING SYSTEMS ANALYSIS IN RURAL AREAS OF MEXICO

4.1 RESUMEN

La falta de agua de calidad para satisfacer las necesidades de la población rural en muchos países, como México, se ha convertido en uno de los principales retos a los que los gobiernos se enfrentan al proveer condiciones de vida adecuadas. La situación ha empeorado debido a la variabilidad en los patrones de lluvia provocada por el cambio climático. La captación de agua es una técnica antigua que permite contar con una fuente de agua adicional para varios usos. La falta de herramientas para la toma de decisiones disponibles en estos ecosistemas ha impedido la correcta toma de decisiones. El apoyo computacional presentado en este trabajo tiene como objetivo funcionar como una herramienta de decisión en zonas rurales marginadas en donde se pretende diseñar un sistema de captación de agua de lluvia. Las variables de entrada necesarias pueden obtenerse fácilmente y el sistema cuenta con información preinstalada usada en el cálculo del balance hídrico. El software cuenta con una interfaz amigable que permite la entrada de información propia del lugar en donde se está diseñando el sistema. La información de entrada puede ser modificada hasta llegar a un resultado satisfactorio. El sistema genera estocásticamente los eventos de lluvia y, a partir de ellos, se puede llevar a cabo un análisis para el diseño de la captación de agua bajo diferentes probabilidades de generación de escurrimiento.

Palabras clave: captación de agua, escurrimiento en techos, zonas rurales, software.

4.2 ABSTRACT

Lack of sufficient water of good quality to fulfill the needs of rural population in many countries, such as Mexico, has become one of the main issues governments have to cope with to provide adequate living conditions. The situation has worsened due to the variability of rainfall patterns influenced by climate change. Water harvesting is an ancient practice that contributes to have an additional water supply for different uses. The lack of sufficient readily available decision tools within these environments has prevented the adequate decision process. The computer aid presented in this paper serves the purpose of having a decision tool for the use in rural marginal areas where a water harvesting system is to be designed. Input variables are easily obtained and the system has preloaded information that is used within the water balance. The computer aid has a friendly interface where the user may plug local information for obtaining outputs from

where a decision can be made. Input variables can be changed as needed until arriving to an acceptable output. The system generates stochastically rainfall amounts from where posterior analysis may be pursued in terms of designing a roof water harvesting under different probabilities of runoff occurrence.

Keywords: water harvesting, roof runoff, rural areas, software.

4.3 INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua para diversos usos en las zonas áridas alrededor del mundo es el principal reto que enfrentan las personas que ahí viven (The Water Project, 2018) y, más de una vez, ha sido causa de conflictos, protestas y bloqueos (Kumar *et al.*, 2011). La situación ha empeorado debido a la incertidumbre impuesta por el fenómeno del cambio climático. Los países en desarrollo afrontan problemas similares en el tema de la calidad del agua y su distribución. Principalmente, la problemática del acceso al agua en estos países se refleja en las comunidades marginadas (USAID, 2009). Por ejemplo, en Sudáfrica el gobierno ha impuesto suministros intermitentes de agua debido a la sequía que atraviesa la (The Water Project, 2018). Por otra parte, en India la contaminación del agua superficial y la falta de tratamiento del agua residual e industrial, se ha incrementado la explotación de las fuentes de agua subterráneas en diversas regiones (Murty and Kumar 2011). En México, casi un tercio de las viviendas localizadas en comunidades rurales con población menor a 2500 habitantes carece agua potable y más del 63% no cuenta con los servicios básicos relacionados al agua (CONAGUA, 2010). Adicionalmente, la mayor parte de las comunidades rurales en el país se encuentran en zonas áridas y semiáridas, además de presentar un retraso social que impide su desarrollo económico (Figura 11).

Las naciones en vías de desarrollo deberían poder recuperar, aplicar y compartir métodos tradicionales que reduzcan el impacto de desastres naturales como los periodos largos de sequía que muchas naciones han enfrentado en años pasados. Estos esfuerzos debieran ser complementados con el acceso al conocimiento científico y técnico reciente. El conocimiento existente podría estudiarse para intentar aplicarlas de mejor forma (Harding, 2003).

Las técnicas para la captación de agua son una opción viable para que las comunidades rurales se sobrepongan a la falta de lluvia y satisfagan sus necesidades básicas. Las

características físicas, químicas y bacteriológicas del agua captada comúnmente se asemejan a aquellas buscadas en el agua potable (Biswas and Mandal, 2014). Además, el agua de lluvia se encuentra libre de muchos minerales e incluso algunos contaminantes como el arsénico, que es un problema en diversas regiones de México y por lo tanto, su uso es seguro si se almacena correctamente. La implementación correcta de un sistema de captación de agua de lluvia permite que ésta se convierta en una fuente de agua valiosa e incluso necesaria en ocasiones. Por otra parte, la agricultura de traspatio se lleva a cabo en comunidades rurales de México como una forma de garantizar los alimentos durante la época de sequía. Este tipo de agricultura presenta dos ventajas principales, ahorro y el intercambio con comunidades vecinas (Jaramillo et al 2017). Sin embargo, el agua para riego de los cultivos puede ser el factor limitante para la agricultura de traspatio. En comunidades marginadas, cualquier alternativa debe ser económicamente viable y muy simple de usar. En este sentido, el dimensionamiento de la cisterna juega un papel clave. Una cisterna más grande de lo necesario se convierte en un desperdicio de energía y dinero mientras que una más pequeña no podrá satisfacer las necesidades o ser suficiente para recolectar el total de agua. Por lo tanto, los hábitos de consumo de las viviendas y las características de la comunidad deben ser consideradas al diseñar la cisterna (Mahmudul et al., 2016). Un ejemplo exitoso de la aplicación de la captación de agua de lluvia viene de Australia, en dónde 2.3 millones de familias (26%) utilizan el agua de lluvia como una fuente de agua en 2013 (Chubaka, 2018). En América Latina podemos encontrar promedios de lluvia anual que varían entre 500 y 1500 mm. Frecuentemente la lluvia se concentra en unos meses al año (UNEP, 1997). Es en estos meses cuando la captación de agua de lluvia se convierte en una técnica asequible debido al sobreprecio que sufre el agua potable y a las deficiencias en el sistema de distribución de agua municipal.

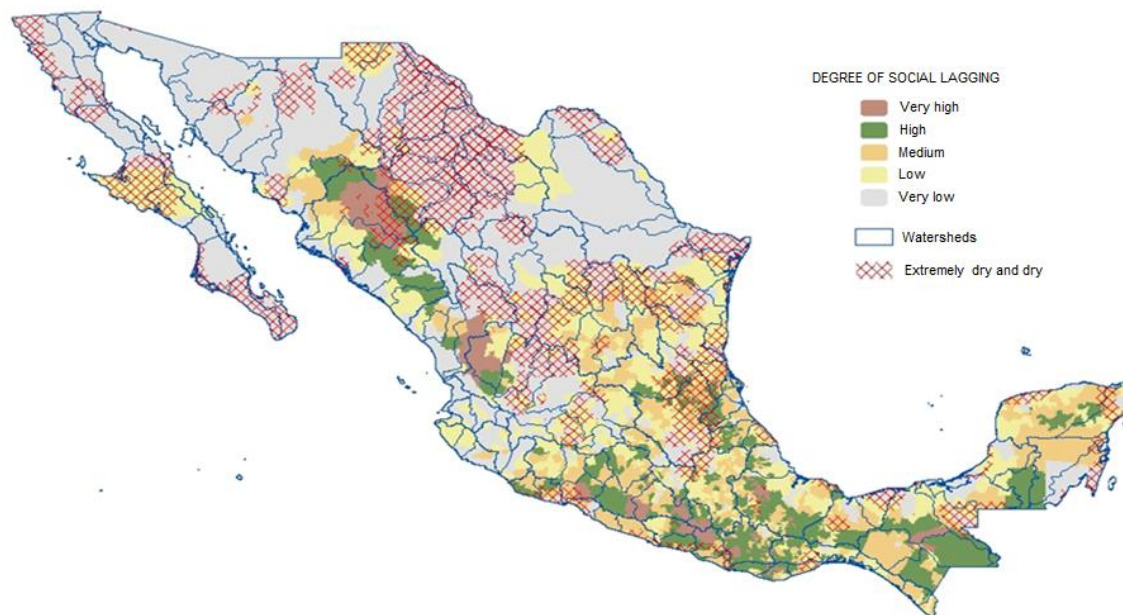


Figura 11 Rezago social y condiciones de sequía en México. Con información de CONAPO (2002). Condiciones de sequía elaboradas de acuerdo al Índice Estandarizado de Precipitación (Sánchez-Cohen et al 2015)

La captación de agua de lluvia en techos se ha convertido en una alternativa atractiva en las zonas rurales de México (CONAGUA, 2016). Sin embargo, la falta de procedimientos técnicos disponibles para los técnicos y habitantes de dichas zonas rurales para determinar el tamaño del sistema de acuerdo a la presencia de lluvias es el principal reto que debe afrontarse (Sánchez - Cohen et al 2014).

El objetivo de este estudio fue construir una herramienta computacional que permite realizar un análisis del balance hídrico de manera sencilla, para el almacenamiento del agua de lluvia en las zonas rurales y áridas del norte de México, considerando la variabilidad estacional.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1 Desarrollo de la herramienta computacional

Un programa computacional fue desarrollado en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias; Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (INIFAP CENID-RASPA), en la

ciudad de Gómez Palacio, Durango, para realizar el balance hídrico de los sistemas de captación de agua de lluvia en comunidades rurales de México dada determinada información de entrada. El diagrama de flujo general del software se muestra en la figura 12.

El programa cuenta con una interfaz amigable para elegir variables de entrada ajustadas a las condiciones de la comunidad. En orden de aparición, el usuario debe primero elegir el estado, posteriormente el municipio y finalmente la comunidad. Usando esta información, el sistema despliega el nombre y ubicación de la estación meteorológica más cercana que puede ser elegida. Las estaciones meteorológicas tienen matrices de transición de probabilidad precargadas para series de precipitación que serán usadas para la generación de precipitación diaria. El usuario puede escoger la comunidad y la estación meteorológica tanto del mapa como de una lista de opciones. Si dentro del municipio seleccionado no se encuentra ninguna estación, el sistema recomendará la estación más cercana al lugar de interés. Una vez seleccionada la locación, el usuario puede visualizar la ubicación de la estación meteorológica en una vista satelital. La programación se realizó en FORTRAN y posteriormente fue emigrado a una plataforma Delphi.

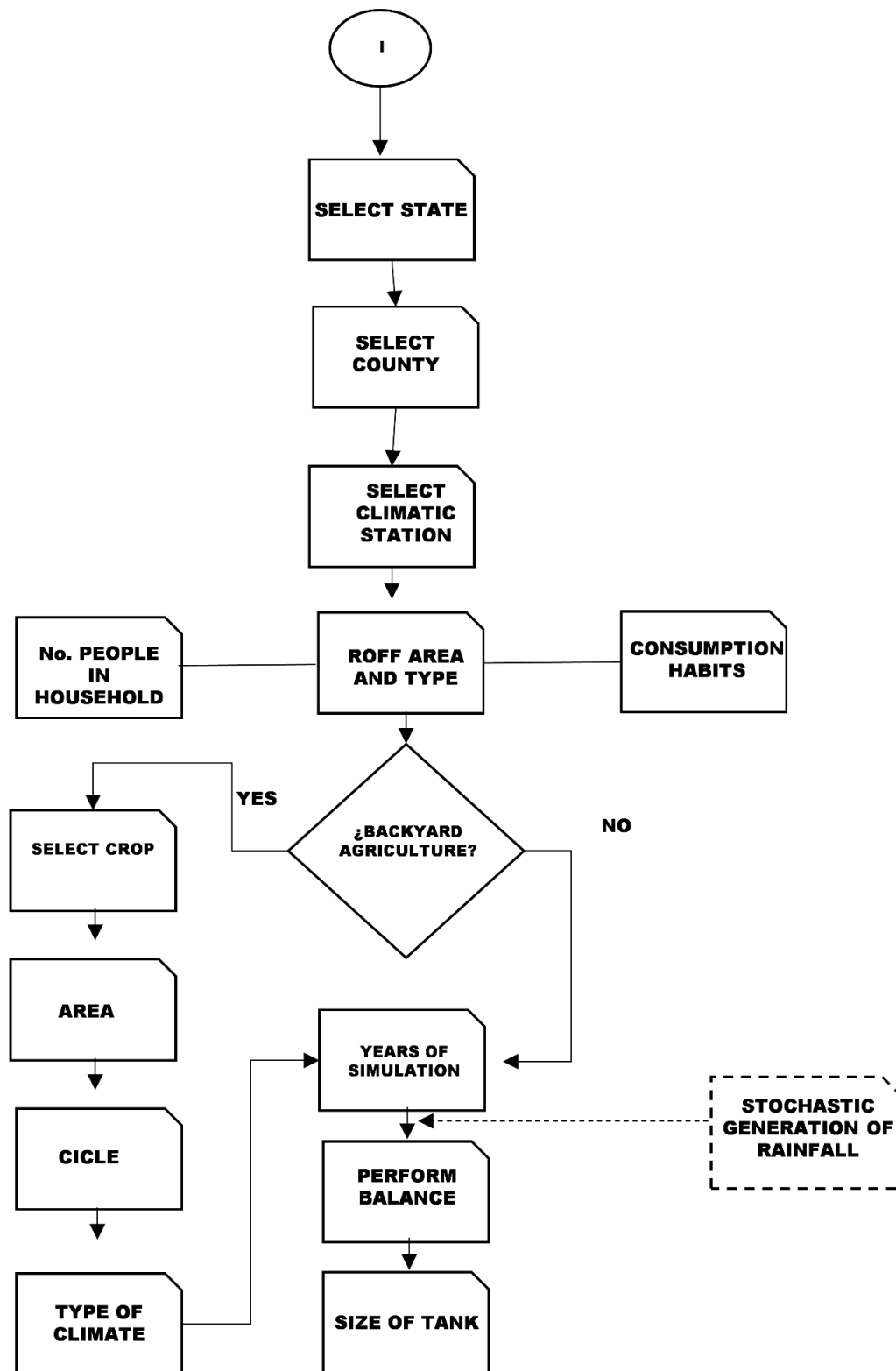


Figura 12 Diagrama de flujo general del software utilizado para realizar el balance hídrico.

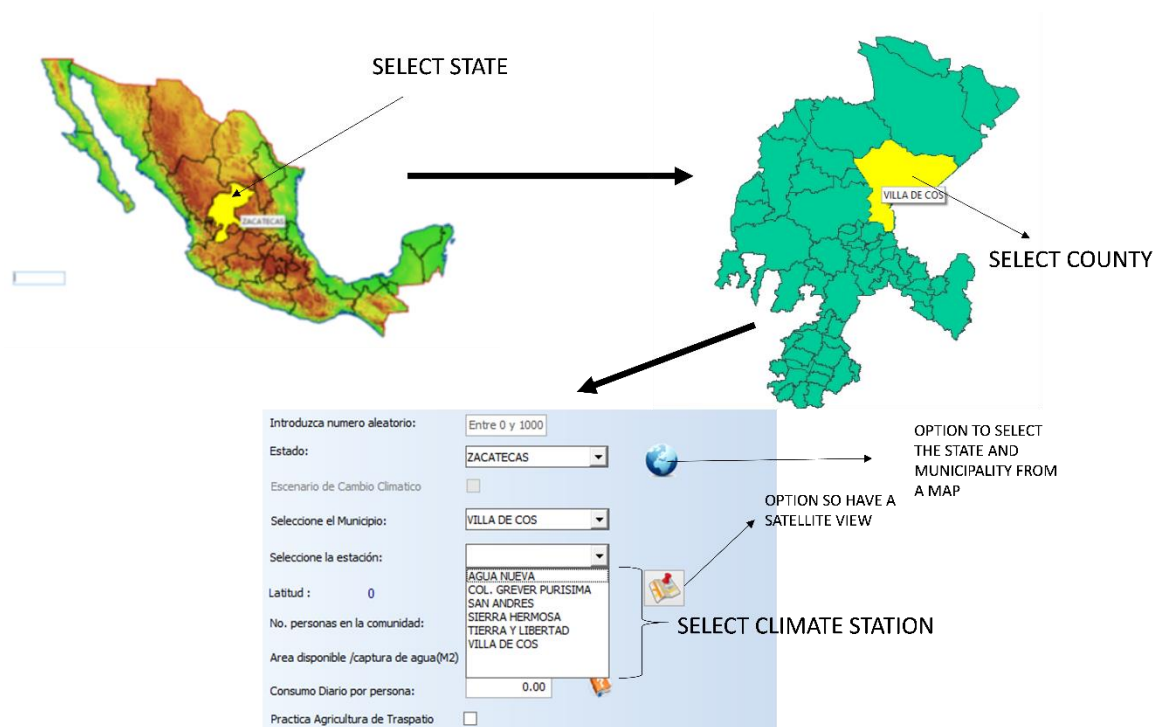


Figura 13 Interfaz para elegir los parámetros del balance hídrico.

La vivienda debe describirse en términos del área de techo y el tipo de material del mismo, el número de personas que ahí residen y sus hábitos de consumo de agua. La interfaz ofrece algunos parámetros preestablecidos para el consume de agua. El uso del agua varía dependiendo de la situación de la vivienda; véase por ejemplo Singh and Turkiya (2013).

Seleccione la estación: AGUA NUEVA

Latitud : 23.7 Longitud : -102.167

No. personas en la comunidad: 0

Area disponible /captura de agua(M2) 0.00

Consumo Diario por persona: 0.00

Practica Agricultura de Traspatio ☐

Coefficiente de Esguerrimiento 0.00

Tipo de Clima:
 Cuantos años desea simular:
 Desierto Arido
 Semi Arido
 Sub Humedo
 Humedo

A

CLIMA	NECESIDADES (LPD/P)
Humedo - Semihumedo	113-500
Arido con llave	37
Arido acarreo menor a 200mts	10
Arido acarreo mayor a 200mts	5

SELECTION OF WATER NEEDS ACCORDING THE SITUATION OF THE HOUSEHOLD

B

TIPO	RANGO
Concreto	0.60 - 0.80
Pavimento	0.50 - 0.60
Geomembrana PVC	0.85 - 0.90
Azulejos, Teja	0.80 - 0.90
Hojas de Metal Acanaladas	0.70 - 0.90
Orfanicos (Hojas con barro)	<0.2
Tierra	0.3

SELECTION OF RUNOFF COEFFICIENT

Conservar graficas ☒

C

SELECTION OF TYPE OF CLIMATE

Figura 14 Parámetros de entrada para las necesidades de agua de acuerdo a la disponibilidad de la misma (A), el coeficiente de escurrimiento (B) y el tipo de clima (C).

Cuadro 4 Consumo típico de agua en viviendas rurales en zonas áridas del norte de México.

CLIMA Y CONDICIÓN	LITROS POR PERSONA DIARIOS
Húmedo – Sub húmedo	113 – 500
Árido con toma de agua	37
Árido; camina <200 m para obtener agua	10
Árido; camina >200 m para obtener agua	5

El tipo de techo se refiere al material con que está construido que puede estar en buenas o malas condiciones. Existen diversas opciones en la interface para elegir el tipo de techo y su consecuente coeficiente de escurrimiento (CE). El CE se refiere a la porción de la lluvia que se convierte en escurrimiento y depende del tipo y condición del material del techo (Bhagawati et al, 2015). No obstante, para el propósito de este estudio se llevó a

cabo un estudio para determinar los tipos de techo predominantes en las comunidades rurales estudiadas. Siete comunidades pertenecientes a dos municipios del estado de Durango fueron encuestadas como representativas de las zonas rurales áridas. La figura 15 muestra las comunidades encuestadas. Se identificaron tres tipos de techos:

- a) Suelo compactado
- b) Lámina galvanizada
- c) Cemento

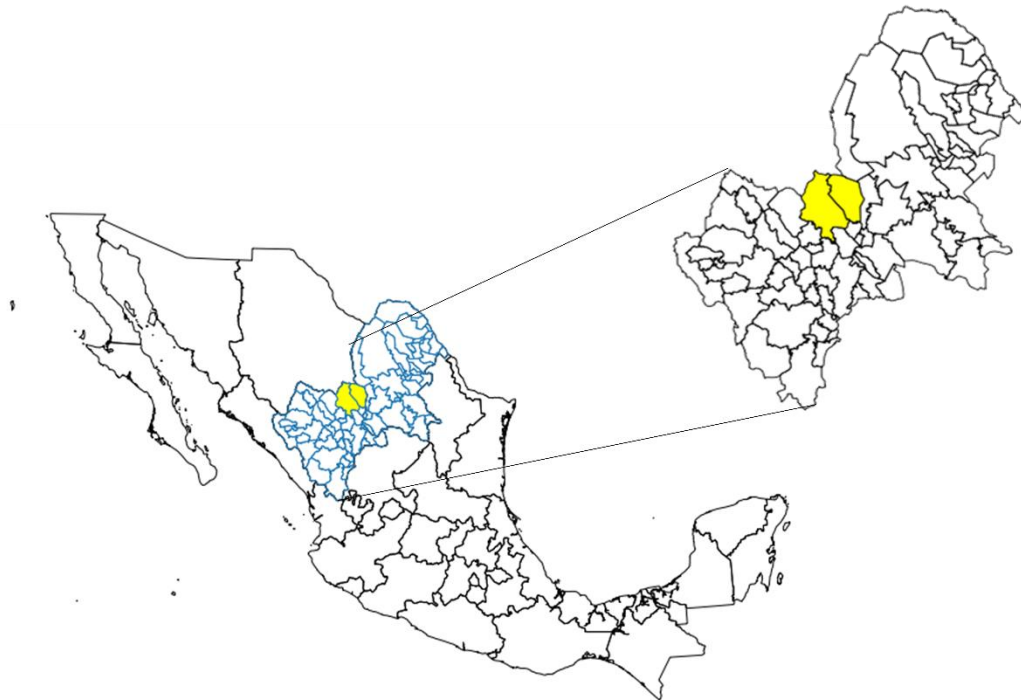


Figura 15 Localidades encuestadas para la caracterización hidrodinámica de los techos. Se muestran los estados de Durango y Coahuila con los municipios estudiados (Mapimí con cinco comunidades y Tlahualilo con dos).

El coeficiente de escurrimiento (CE) para los diferentes tipos de techo se obtuvo a través de una serie de simulaciones de lluvia llevados a cabo en los tejados de las viviendas seleccionadas, como se detalla en el capítulo anterior. Se indujo una intensidad de lluvia

de 93 mm hr⁻¹ (Periodo de retorno de diez años). El agua escurrida fue recolectada y el CE fue calculado de acuerdo a la Ecuación 1:

$$CE = \frac{Q}{P_{pe}} \quad (1)$$

Donde Q es el volumen total colectado y Ppe es el volumen de lluvia simulada.



Figura 16 Proceso para obtener el coeficiente de escurrimiento en un techo de cemento en buenas condiciones (izquierda) y en malas condiciones (derecha). Nótese el simulador de lluvia.

Dentro del software, el usuario podrá elegir el coeficiente de escurrimiento que más se asemeje a la situación en particular que afronta. El programa despliega más opciones de CE además de los obtenidos por las encuestas, extraídos de la literatura.

4.4.2 Generación estocástica de lluvia

El diseño adecuado de un sistema de captación de agua de lluvia en una región determinada debe tomar en cuenta el comportamiento temporal y espacial de la lluvia y los requerimientos hídricos de los cultivos, en adición a las características de la captación (Srivastava, 2001). Generalmente, los diseñadores de estos sistemas toman en cuenta los valores de precipitación con un 50% de probabilidad de ocurrencia para determinar la capacidad de los mismos; esto subestima o sobreestima el balance la mayoría del tiempo. En este sentido, la naturaleza estocástica de los eventos de lluvia debe considerarse en el diseño ya que toma en cuenta la variación de las probabilidades en el tiempo.

Una vez que el usuario ha seleccionado la estación meteorológica, se lleva a cabo la generación de la lluvia para estimar los eventos de lluvia diarios para un número de años seleccionados basado en información histórica y estadística de la estación meteorológica. La cantidad de lluvia diaria se simula usando un modelo de cadenas de Markov en donde la ocurrencia de la lluvia se describe mediante cadenas de Markov de primer orden y la cantidad de lluvia de cada evento está basada en una distribución exponencial (Sanchez-Cohen, *et al.* 1997, Sanchez–Cohen *et al.* 2014):

$$F_{x1}(x) = P(x_1 \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (2)$$

Donde λ = inverso de la precipitación diaria (Hanson *et al.* 1975). La cadena de Markov de primer orden utiliza dos estados definidos por las probabilidades de transición:

$$p_{ij}(n) = P(X_n = j | X_{n-1} = i); \quad i, j = 0, 1; n = 1, 2, \dots, 120 \quad (3)$$

Donde el estado 0 significa un día seco y el estado 1 representa un día con lluvia y:

$$p_{i1}(n) = 1 - p_{i0}(n); \quad i = 0, 1 \quad (4)$$

Por lo tanto, estas probabilidades de transición definen cuatro posibles condiciones: P_{00} – la probabilidad de un día seco dado que el día anterior también lo fue; P_{01} – la probabilidad de un día seco dado que el día anterior llovió; P_{10} – la probabilidad de un día con lluvia dado que el día anterior fue seco; y P_{11} – la probabilidad de un día con lluvia dado que el día anterior también hubo lluvia (Sanchez - Cohen *et al.* 1997). Tanto las cadenas de Markov como la distribución exponencial deben ser calculados para un periodo seleccionado de lluvia diaria utilizando métodos descritos por Woolhiser y Roldan (1986) y por Wilks (1995).

Una vez que los parámetros de distribución fueron definidos, el proceso de simulación consiste en generar un número aleatorio entre 0 y 1 para determinar si ocurre o no lluvia

en cierto día usando las ecuaciones 2 y 3. Si ocurre un evento de lluvia, otro número aleatorio independiente se genera y transforma para calcular la cantidad de lluvia usando la ecuación 2 (Sanchez – Cohen *et al.* 2014).

Balance hídrico

El programa también calcula el agua necesaria por los cultivos, si es que se practica agricultura de traspatio. En este apartado, el usuario debe elegir de entre diversas opciones de cultivo y señalar el área destinada al cultivo (Cuadro 5).

Cuadro 5 Requerimientos de agua promedio por tipo de clima, cultivo y fechas de cosecha para distintas hortalizas (Blower y Heibloen, 1986).

Cultivo	Fecha de siembra	Meses a la cosecha	Et (mm.day ⁻¹)			
			TIPO DE CLIMA →			
			DESI ERT O	SEMI ARIDO	SUB HUMED O	HUMED O
Pepino	Feb – Jun	2 – 5	6.30	5.40	4.50	2.70
Rábano	Todo el año	4 .4.5	6.30	5.40	4.50	2.70
Calabacín	Mar- May	3 -5	6.30	5.40	4.50	2.70
Zanahoria	Todo el año	3 – 4	7.30	6.30	5.30	3.30
Coliflor	May – Jun	6 – 7	7.30	6.30	5.30	3.30
Brócoli	May – Aug	6	7.30	6.30	5.30	3.30
Lechuga	Todo el año	2 – 4	7.30	6.30	5.30	3.30
Melón	Feb – Jun	3	7.30	6.30	5.30	3.30
Ajo	Jan – Mar	4 – 5	7.30	6.30	5.30	3.30
Cacahuete	May – Jun	3 – 5	7.30	6.30	5.30	3.30
Morrón rojo	Jan – May	5 – 6	7.30	6.30	5.30	3.30

Spinaca	Todo el año	2 – 3	7.30	6.30	5.30	3.30
Maíz	Mar – Jul	4 – 5	8.00	7.00	6.00	4.00
Frijol	Feb – Jul	4 – 5	8.00	7.00	6.00	4.00
Tomate	Jan – May	5 - 6	8.00	7.00	6.00	4.00

La naturaleza estocástica del programa permite al usuario realizar simulaciones de muchos años, estimando la lluvia diaria como se explicó anteriormente, que se usará para calcular el balance hídrico diario. Los componentes de balance hídrico son:

El volumen total de escurrimiento luego de cada evento de lluvia (VE):

$$VE = (Ppe * A) * CE \quad (5)$$

Donde Ppe es la cantidad de lluvia, A es el área de techo utilizada para la captación y CE es el coeficiente de escurrimiento del techo. El balance hídrico considera una entrada (agua captada) y una salida (el consumo por parte de humanos, animales y cultivos), como se muestra en la ecuación (6)

$$Tc = Ch + Ca \quad (6)$$

Donde Tc es el consumo total del sistema, Ch es el consumo de la vivienda (incluye el agua usada para cocinar, lavar y el mantenimiento de la vivienda) y Ca son las necesidades hídricas de la agricultura de traspatio, que se calcula como se muestra en la ecuación (7):

$$Ca = Et - Pe \quad (7)$$

Donde Et es la evapotranspiración obtenida de la Cuadro 5; Pe es la precipitación efectiva, que es calculada mensualmente utilizando el método de Precipitación Confiable (FAO, 1992) como:

$$\text{si } P_{pe} \leq 70 \text{ mm entonces } P_e = (0.6 * P_{pe}) - 10 \quad (8)$$

$$\text{si } P_{pe} > 70 \text{ mm entonces } P_e = (0.8 * P_{pe}) - 24 \quad (9)$$

El balance global (Bal) se muestra en (10):

$$\text{Bal} = (\text{VE} - \text{Tc}) \quad (10)$$

La eficiencia de riego se consideró total (100%) en los cálculos debido a lo pequeño de las áreas dedicadas a la agricultura de traspatio. No obstante, algunos subsidios gubernamentales en México, a través de la Comisión Nacional de Zonas Áridas ha instalado sistemas de riego por goteo en huertos familiares alimentados por sistemas de captación de agua de lluvia, lo que puede ahorrar entre un 20 y un 50% de agua comparado con otros métodos de riego.

El balance hídrico se realiza en base diaria pero los resultados se muestran en base mensual. La capacidad del tanque de almacenamiento será el volumen promedio disponible más grande en determinado mes.

4.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de calcular el balance hídrico diario por el número de años seleccionados, la interfaz del programa permite observar los resultados en forma de tablas o gráficos (Figuras 17 y 18). La primera opción permite ver el balance mensual para cada uno de los años simulados. El usuario puede regresar y modificar la información de entrada hasta conseguir un resultado aceptable. Los parámetros modificables son: Número de personas que habitan en la vivienda, el tamaño y tipo de área de techo, los hábitos de consumo de agua, el uso del huerto familiar, el cultivo, las fechas de siembra y cosecha. Al principio de la simulación se asume que el tanque de almacenamiento se encuentra vacío.

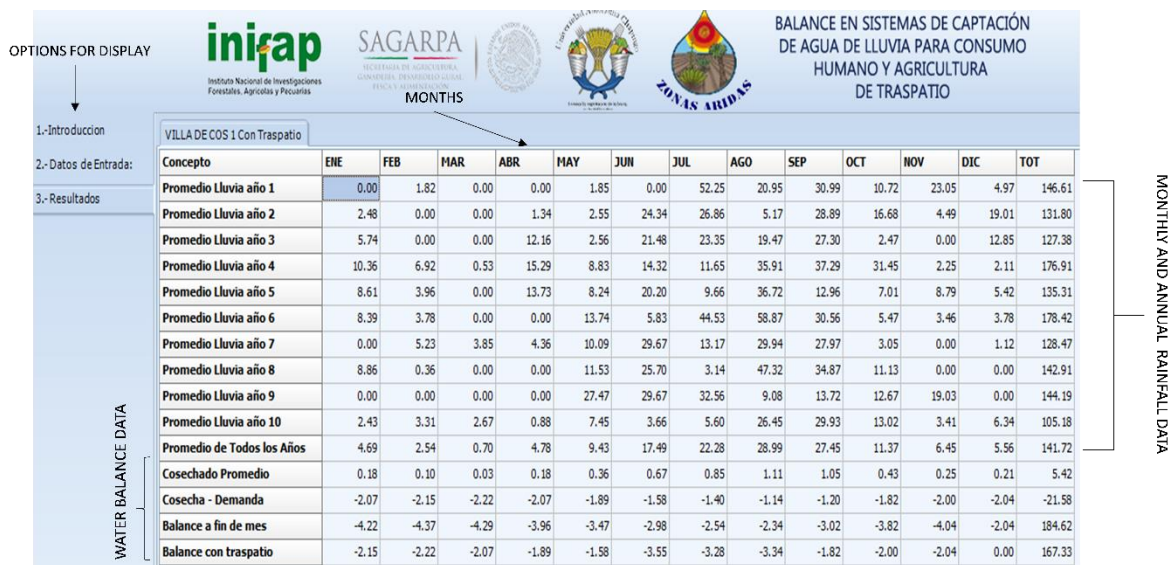


Figura 17 Ejemplo de resultados de lluvia mensual.

Dentro de los gráficos, el usuario puede seleccionar la información que desea sea procesada y mostrada: precipitación, volumen captado, balance hídrico sin agricultura de traspatio o balance hídrico con agricultura de traspatio. Posteriormente, el usuario podrá conservar los gráficos seleccionados y regresar a cambiar algunos de los datos de entrada y correr el programa nuevamente para obtener nuevos gráficos para compararlos con los anteriores. La información en tablas también se conserva para su posterior análisis. Si el volumen requerido excede al recolectado, el balance se mostrará con un signo negativo (déficit) indicando el agua requerida para satisfacer las necesidades de la vivienda. En este punto, el usuario podrá regresar en el análisis y realizar los cambios necesarios para lograr resultados satisfactorios.

Luego de visualizar los resultados, el usuario podrá exportar la información a una hoja de cálculo, imprimir los resultados seleccionados y copiar las imágenes al portapapeles para visualizarlos en el futuro.

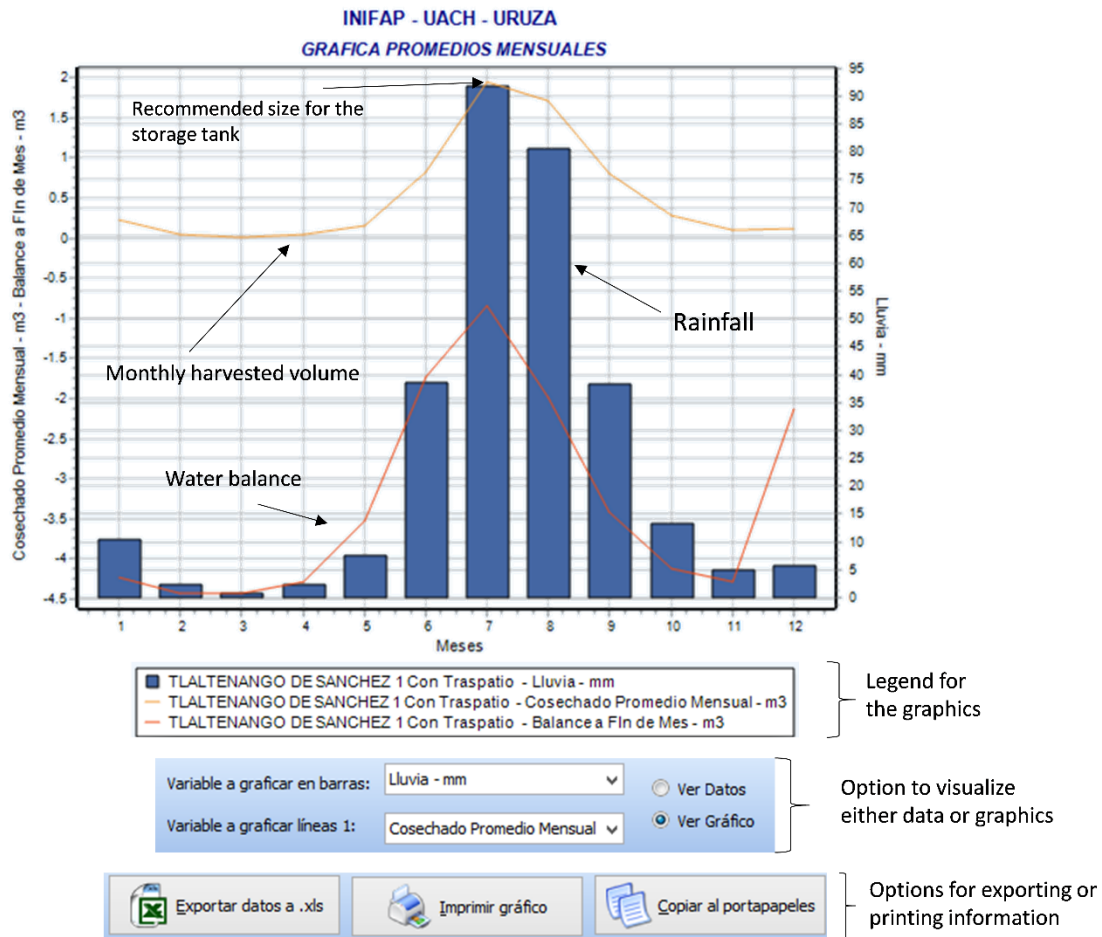


Figura 18 Ejemplo de resultados. Dentro de la interface de resultados se encuentran diversas opciones para desplegar.

4.5.1 Análisis posterior

El proceso de generación estocástica de lluvia provee información respecto a qué esperar con respecto a la presencia de precipitación en un tiempo determinado. Además, es posible realizar inferencias estadísticas para analizar distintas probabilidades de ocurrencia en un intervalo de tiempo utilizando marcadores Z. De forma similar al análisis de la información de escurrimiento, el usuario puede decidir el tamaño del tanque de almacenamiento y realizar un análisis económico, si se desea. El programa maneja el escurrimiento promedio mensual colectado del techo analizado; sin embargo, el usuario puede utilizar cualquier otro periodo de retorno para ampliar los criterios utilizados para determinar el tamaño de la cisterna (Figura 9)

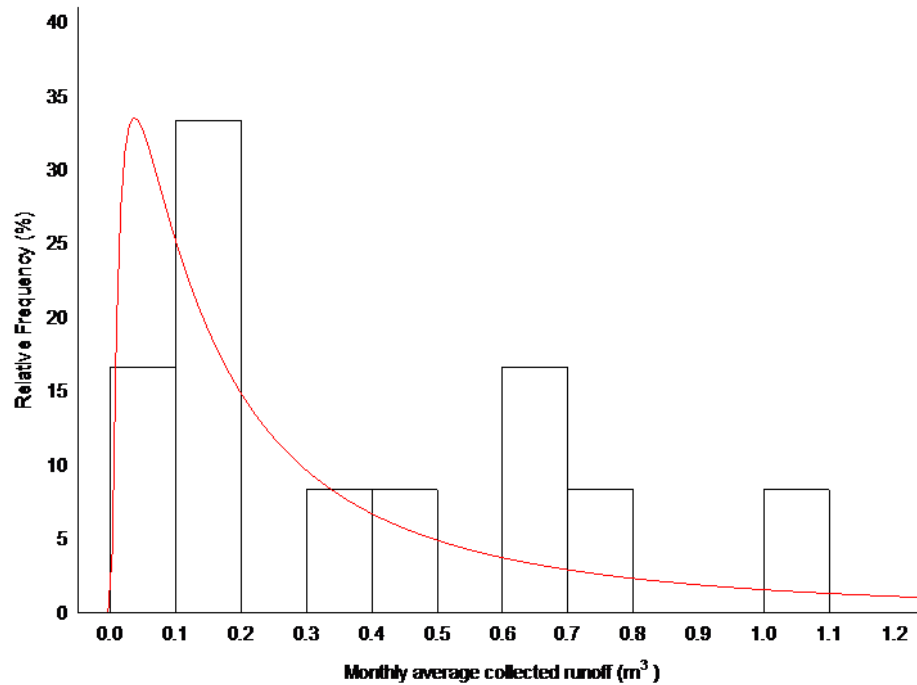


Figura 19 Función de densidad probabilística del escurrimiento promedio mensual recolectado en 50 años de simulación para un tipo de techo dado de donde el usuario puede obtener la probabilidad de que ocurra un evento de cierta magnitud. Para este ejemplo, el valor promedio es 0.385 y la desviación estándar es de 1.33 m³.

Por ejemplo, si el usuario quiere conocer la probabilidad de que el escurrimiento sea de 0.5 m³ o menos en determinado mes, entonces al estandarizar la distribución logarítmica expresada en la Figura 19 se obtiene:

$$Z = \frac{(x - \bar{x})}{\sigma} = \frac{(0.5 - 0.385)}{1.33} = 0.0864 \quad (12)$$

Donde “x” es el evento de escurrimiento del cual queremos conocer la probabilidad, $\bar{x}$ es el promedio de los eventos de escurrimiento y σ es la desviación estándar. La información brindada arroja un valor “z” de 53.19%.

4.6 CONCLUSIONES

Esta herramienta cumple el propósito para el que fue diseñada: estimar tanto el volumen de agua que podría ser captado bajo condiciones locales específicas como la capacidad del tanque de almacenamiento. La herramienta computacional usada en este trabajo podría ser útil a técnicos, planeadores y agencias gubernamentales durante el proceso de toma de decisiones y el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia. Además, con base en los resultados de la predicción de precipitación y la estimación del agua colectada, el gobierno y los servicios hidráulicos se encontrarían en una mejor posición para planear el abastecimiento de agua potable dónde y cuándo se requiera, minimizando los efectos sociales adversos derivados de un abastecimiento inadecuado.

4.7 LITERATURA CITADA

- The Water Project. Available at <https://thewaterproject.org/water-crisis/water-in-crisis-south-africa>. Last time visited June 11th 2018.
- CONAGUA. 2010. Estadísticas del agua en México, edición 2010, México D. F., SEMARNAT.
- Bhagawati, P. B., Panhalkar, N. M. and Zende A.M. 2015. Rooftop rainwater harvesting system – a model based approach. National Conference on Modeling, Optimization and Control.
- Biswas, B and B. Mandal. 2014. Construction and evaluation of rainwater harvesting system for domestic use in a remote and rural area of Khulna, Bangladesh. International Scholarly Research Notices 2014:1-6.
- Brouwer C. and M. Heibloem. 1986. Irrigation water management. Training manual no. 3. FAO.
- Chubaka, C., H. Whiley, J. Edwards and K. Ross. 2018. A review of roof harvested rainwater in Australia. Journal of Environmental and Public Health 2018: 1-14.
- CONAGUA. 2016. Lineamientos técnicos: sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda. Programa nacional para captación de agua de lluvia y ecotecnias en zonas rurales (PROCAPTAR). Mexico. Available at: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152776/LINEAMIENTOS_CAPTACI_N_PLUVIAL.pdf. Last time visited June 11th 2018.
- Consejo Nacional de Población. CONAPO 2002. Indice de intensidad Migratoria.
- Harding H. 2003. Community Coping Strategies. Integrating all of the factors of disaster risk. UN Inter-Agency Secretariat for the ISDR. U.N. Economic Commission for Africa.

- FAO. 1992. Cropwat. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. FAO. Estudios Riegos y Drenajes nº 46. Rome.
- Jaramillo Villanueva J., L. Morales Jiménez and V. Domínguez-Torres. 2017. Importancia económica del traspasio y su relación con la seguridad alimentaria en comunidades de alta marginación en Puebla, México. *Agro productividad* Vol 10, No. 7. Pp 27 – 32. Mexico
- Kumar, R., S. Thaman, G. Agrawal and P. Sharma. 2011. Rainwater harvesting and ground water recharging in north western Himalayan Region for sustainable agricultural productivity. *Universal Journal of Environmental Research and Technology* 1:539-544.
- Lopes, V., G. Fernandes, F. Dornelles and J. Medellin-Azuara. 2017. Performance of rainwater harvesting systems under scenarios of non-potable water demand and roof area typologies using a stochastic approach. *Journal of Cleaner Production* 137:60-69.
- Mahmudul, M., A. Rahman and B. Samali. 2016. Evaluation of climate change impacts on rainwater harvesting. *Journal of Cleaner Production* 137:60-69.
- Murty M.N., and S. Kumar. 2011. Water pollution in India. An economic appraisal. India infrastructure report 2011. Available at: <file:///C:/Users/INIFAP/Downloads/Chp-19-Water-Pollution-in-India-An-Economic-Appraisal.pdf>. Last time visited July 31th 2018.
- Srivastava R.C. 2001. Methodology for design of water harvesting system for high rainfall areas. *Agricultural Water Management*. Vol, 47, No. 1. Pp 37-53
- Sanchez-Cohen I., G. Diaz-Padilla, M. Velasquez-Valle, D.C. Slack, P. Heilman and A. Pedroza-Sandoval. 2014. A decision support system for rain fed agricultural areas of Mexico. *Computers and Electronics in Agriculture* 114 (2015) 178–188
- Sanchez – Cohen I., V.L. Lopez, D.C. Slack and M. M. Fogel. 1997. Water Balance Model for Small – Scale Water Harvesting Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Pp 123 – 128.
- Sanchez Cohen I., G. Esquivel Arriaga, M. Velasquez Valle. G. Díaz Padilla and M. Nuñez Lares. 2015. Mexico ante la Urgencia Climática. *Ciencia Política y Sociedad*. Xoxhitl Cruz, Gian Carlos and U. Oswald Eds. Autonomous University of Mexico.
- Singh O. and S. Turkiya. 2013. A survey of household domestic water consumption patterns in rural semi-arid village, India. *GeoJournal* 78:777–790.
- UNEP. 1997. Source Book of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean. Available at: <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea59e/begin.htm#Contents>. Last time visited June 18th 2018.
- USAID.2009. Addressing water challenges in the developing world: a framework for action. Bureau of Economic Growth, Agriculture, and Trade U.S. Agency for International Development. U.S.A. Available at:

https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/F619FB3C75EA4FEF492576F8000425CD-Framework_for_Action.pdf. Last time visited June 18th 2018.

Wilks, D.S., 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press, United Kingdom, 467p.

Woolhiser, D.A., Roldan, J. 1986. Seasonal and regional variability of parameters for stochastic daily precipitation models: South Dakota, U.S.A. Water Resour. Res. 22 (6), 965–978.