



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

División de Ciencias Forestales

**“LA COSECHA DE AGUA DE LLUVIA EN ZONAS
ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS”**

TESIS PROFESIONAL

(En la modalidad investigación bibliográfica)

Que como requisito
parcial para obtener el
Título de

INGENIERO EN RESTAURACIÓN FORESTAL

PRESENTA:

COLUMBA VICENCIO SALAS SOLÍS

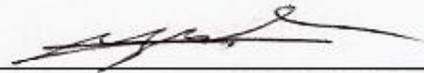


DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
COMISIÓN DE EXÁMENES PROFESIONALES

Chapingo, México, Julio de 2013

La presente tesis titulada **“La Cosecha de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas”**, en la modalidad de investigación bibliográfica, fue elaborada por la C. Columba Vicencio Salas Solís bajo la dirección del Dr. Diodoro Granados Sánchez. Ha sido revisada y aprobada por el siguiente Comité Revisor y Jurado Examinador, para obtener el título de Ingeniero en Restauración Forestal.

PRESIDENTE:



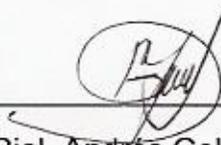
Dr. Diodoro Granados Sánchez

SECRETARIO:



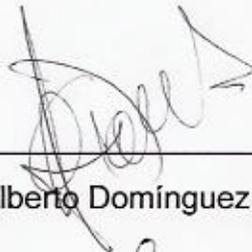
Biol. Antonio Cortez Jiménez

VOCAL:



Biol. Andrés Gelacio Miranda Moreno

SUPLENTE:



Dr. Francisco Alberto Domínguez Álvarez

SUPLENTE:



M. C. Javier Santillán Pérez.

AGRADECIMIENTOS

Por hacer posible que la educación pública siga existiendo en el país, agradezco a los ciudadanos de México, que de alguna manera aportan su grano de arena, ya sea económico a través de impuestos o de alguna otra índole.

Agradezco también a todos aquellos que hacen posible el funcionamiento y prestigio de la Universidad Autónoma Chapingo. Especialmente a los profesores que me formaron y dejaron una gran huella.

También doy gracias a los profesores que me instruyeron en el nivel básico de la educación: a aquél que me enseñó a leer y comprender los textos.

Quedo muy agradecida con los miembros del comité revisor y examinador de la presente tesis, ya que gracias a sus correcciones y recomendaciones hicieron posible la satisfactoria culminación de un trabajo respetable, en especial al Dr. Diodoro Granados Sánchez y al Biol. Antonio Cortez Jiménez por sus ineludibles aportaciones.

Al Ingeniero Fernando Gómez Santamaría por haberme brindado su apoyo incondicional y darme la oportunidad de iniciarme en el campo profesional.

Finalmente agradezco a mi preciosa familia, a mis compañeros de antes y amigos de siempre, que indudablemente han sido y seguirán siendo un apoyo constante y decisivo en mi formación personal y profesional.

DEDICATORIA

Dedico el presente escrito a las personas que me han acompañado desde siempre y para siempre, es decir mi familia.

A mis padres, que han sido para mí el mejor ejemplo de superación que un hijo puede tener.

A mis hermanos, por ser mis más grandes amigos.

Y por supuesto a mi hijo, por ser mi mayor impulso y por llenar de felicidad a todos, y a su Padre por ser un gran compañero.

*A la memoria de José Víctor Hernández Martínez
Mi amigo el soñador
(1987-2013)*

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. METODOLOGÍA.....	3
4. MARCO DE REFERENCIA.....	4
4.1. Definición y localización de las zonas áridas y semiáridas	4
4.2. Breve Reseña Histórica De Las Actividades Humanas En Las Zonas Áridas	7
4.3. El uso del suelo en las zonas áridas de México	9
4.3.1. Agricultura de temporal en regiones áridas.....	10
4.3.2. Riego primitivo	11
4.4. El recurso Agua	12
4.4.1. Principales recursos hidráulicos	12
4.5. El Ciclo Hidrológico y el Manejo del Agua de Lluvia	13
4.5.1. Ciclo hidrológico dentro de la biósfera	14
4.5.1. Disponibilidades de agua	20
4.5.1. Balance de agua	22
4.5.2. Bases para la colecta, almacenamiento y conservación de agua de lluvia	23
4.6. Antecedentes sobre la cosecha de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas	24
5. SISTEMAS DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA	26
5.1. Definición	26
5.2. Cosecha de agua en techos.....	28
5.2.1. Cosecha por medio de azoteas o tejados de casa	28
5.2.1.1. Almacenamiento en cisternas superficiales	28
5.2.1.2. Almacenamiento en cisternas subterráneas	29
5.2.2. Caseta de construcción rústica (CCR)	31
5.2.3. Tanque cuenca (TACU)	32
5.2.4. Techo cuenca (TC)	33
5.3. Cosecha de escorrentía superficial.....	35
5.3.1. Las cisternas	35
5.3.2. Estanque o represa.	35
5.3.3. Dogouts	36
5.3.4. Charcos.....	36
5.3.5. Captación a nivel de piso.....	37
5.3.5.1. Sistema ITDG (Intermediate Technology Development Group)	39
5.3.5.2. Sistema LT	40
5.3.5.3. Sistema BC	42
5.3.5.4. Sistema Vecar 500,000 L.....	43
5.3.6. Tajamar	45
5.3.7. Ollas de agua (jagüeyes).....	51
5.3.8. Presas de banco extendido	53
5.3.1. Presas pequeñas de tierras	53
5.3.2. Colectores de agua de lluvia recubiertos con arena	57

5.4. Cosecha de inundación.....	58
5.4.1. Embalses por dique (Presas)	58
5.4.2. Presas de aguas subterráneas	58
5.4.2.1. Presas subterráneas.....	60
5.4.2.2. Presa de almacenamiento de arena	61
5.4.3. Acequias	61
5.5. Aprovechamiento de aguas subterráneas permanentes	63
5.5.1. Los qanats.....	64
5.5.2. Los Pozos	70
6. FACTORES A CONSIDERAR PARA LA ELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS PARA LA COSECHA DE AGUA.....	73
6.1. Elección del sistema de cosecha de agua.....	73
6.2. Construcción de la obra.....	73
6.2.1. Área de contribución o de escurrimiento	76
6.2.1.1. Métodos mecánicos.....	77
6.2.1.2. Métodos químicos.	78
6.2.1.3. Funcionamiento de los materiales.....	80
6.2.1.4. Estimación de la superficie de captación requerida	81
6.2.2. Receptor de agua y/o almacén del agua cosechada.	82
6.2.2.1. Los depósitos excavados.....	82
6.2.2.2. Bolsas para almacenar aguas pluviales.	83
6.2.2.3. Cisternas de concreto o metal	83
6.2.3. Reducción de la capacidad de infiltración del suelo	84
6.2.3.1. Uso de materiales químicos.....	85
6.2.3.2. Reducción de la infiltración mediante coberturas del suelo	90
6.2.4. Los caminos de captación	95
6.2.5. Otros componentes de los sistemas cosechadores	95
6.2.5.1. Desarenadores	95
6.2.5.2. Vertedor de demasías.....	95
6.2.5.3. Filtros	96
6.2.5.4. Abrevaderos.....	97
6.2.5.5. Bombas	97
6.2.5.6. Cercado	97
6.2.6. Control de las pérdidas por evaporación en las superficies de aguas.....	97
6.2.6.1. Reducción de la superficie de evaporación	98
6.2.6.2. Métodos de reflexión.....	100
6.2.6.3. Capas monomoleculares de alcoholes de cadena larga	100
6.2.6.4. Aceites y ceras	101
6.2.6.5. Cubiertas de parafina.....	102
6.2.6.6. Cubiertas mecánicas	102
6.2.6.7. Materiales granulares flotantes.....	104
6.2.6.8. Coberturas flotantes a base de gomas sintéticas	104
6.2.6.9. Reservorios rellenos con arena.....	104
6.2.6.10. Placas suspendidas de material vegetativo	105
6.3. Ventajas y desventaja de las técnicas de colecta de agua de lluvia.....	105
7. TÉCNICAS NO CONVENCIONALES EMPLEADAS PARA LA COSECHA DE AGUA	108
7.1. Lluvia artificial o siembra de nubes.....	108
7.2. Depuración de aguas salinas	108

7.3.	Destilación solar	109
7.4.	Cosecha de agua de niebla	109
7.4.1.	Captadores Planos.....	112
7.4.2.	Captadores cilíndricos	113
7.4.3.	Ejemplo de su aplicación en el mundo.....	113
7.5.	Humedad atmosférica.....	115
7.6.	Algunas técnicas sobrevaloradas y mal manejadas.....	116
7.6.1.	Agua freática	116
7.6.1.1.	Recarga de depósitos de agua freática	116
7.6.1.2.	Nivel de rentabilidad de los depósitos de agua subterránea	117
7.6.2.	Aguas residuales.....	118
8.	CONSERVACIÓN DE AGUA DE LLUVIA IN SITU.....	119
8.1.	Reducción de la evaporación producida en la superficie del suelo	119
8.1.1.	Residuos vegetales	119
8.1.2.	Cubiertas de estiércol y grava	120
8.1.3.	Cubiertas de plástico y papel	120
8.1.4.	Cubiertas de látex, asfalto o petróleo	121
8.2.	Reducción de las pérdidas por transpiración	122
8.2.1.	Antitranspirantes	123
9.	TÉCNICAS PARA OPTIMIZAR EL USO DEL AGUA EN SISTEMAS DE CULTIVOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES	128
9.1.	Agricultura de secano	128
9.1.1.	Algunas innovaciones tecnológicas.....	129
9.1.1.1.	Surcado al contorno.....	129
9.1.1.2.	Terrazas de canal amplio de Zingg.....	129
9.1.1.3.	Fórmula utilizada para calcular la captación in situ del agua de lluvia para cierto cultivo dentro de la agricultura de secano.....	130
9.1.1.4.	Captación del agua de lluvia para riego suplementario.....	132
9.1.2.	Limitaciones	133
9.2.	Sistemas manuales para el establecimiento de plantaciones forestales	134
9.2.1.	Aporcado.....	134
9.2.2.	Sistemas de cepas	135
9.2.3.	Sistemas de zanja y bordo.....	135
9.2.3.1.	Zanja trinchera	136
9.2.3.2.	Sauceda uno.....	137
9.2.3.3.	Sauceda dos	137
9.2.4.	Sistema Español	138
9.2.5.	Zanja ciega.....	139
9.2.6.	Sistema Netzahualcóyotl.....	139
9.2.7.	Sistema Gradoni	140
9.2.8.	Terrazas.....	141
9.2.8.1.	Terrazas de banco	141
9.2.8.2.	Terrazas individuales	142
9.2.9.	Microcuencas de captación.....	143
9.3.	Implementación de sistemas de riego más eficientes	143

10. MÉTODOS MÁS CARACTERÍSTICOS DE COLECTA, ALMACENAMIENTO Y CONSERVACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DEL CENTRO DE MÉXICO.	145
10.1. Delimitación del área	145
10.2. Descripción de los principales métodos de colecta y almacenamiento de agua de lluvia	146
10.2.1. Jagüeyes u "ollas de agua"	146
10.2.1.1. Jagüey doméstico	147
10.2.1.2. Jagüey equipado con filtros de arena	148
10.2.1.3. Jagüey rectangular	149
10.2.1.4. Jagüey que utiliza las carreteras como área de captación	150
10.2.1.5. Jagüey revestido con roca unida con cemento	150
10.2.2. Aljibes	151
10.2.3. Pozos excavados en los lechos de los ríos	153
10.2.4. Presas	153
10.2.5. Galerías filtrantes	155
10.2.5.1. Edad y origen de las galerías filtrantes	155
10.2.5.2. Función e importancia	157
10.2.5.3. Aspectos fisiográficos	158
10.2.5.4. Excavación y mantenimiento	159
10.2.5.5. Observaciones particulares	163
10.2.6. Agricultura de secano	165
10.2.6.1. Agricultura de temporal	166
10.2.6.2. Agricultura en bajíos	166
10.2.6.3. Agricultura de dispersión	166
11. DISCUSIÓN	169
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	172
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174

Índice de Tablas

Tabla 1. Demanda de agua diaria para las principales especies domésticas.....	73
Tabla 2. Requerimientos de consumo de agua para animales silvestres y domesticados (complemento).-----	74
Tabla 3. Aproximación del valor del coeficiente de escurrimiento.-----	75
Tabla 4. Eficiencia de los escurrimientos de los métodos y materiales usados en los procedimientos de cosecha de agua. -----	81

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de las zonas áridas en la República Mexicana (CONABIO, 2008).....	6
Figura 2. Ciclo hidrológico	14
Figura 3. Precipitación frontal, convectiva u orográfica.	16
Figura 4. Recolección de agua de lluvia con cisterna superficial (Mundo <i>et al.</i> , 1997).	29
Figura 5. Cosecha de agua en techos con cisternas subterráneas (Mundo <i>et al.</i> , 1997).....	30
Figura 6. Aspecto de una caseta de construcción rudimentaria (Velasco, 1991).	31
Figura 7. Tanque cuenca para regiones áridas (Velasco, 1991).	32
Figura 8. Techo cuenca apropiado para cosecha de agua pluvial para consumo humano (Velasco, 1991).	33
Figura 9. Estanque sobre terreno inclinado (Velasco, 1991).	36
Figura 10. Vista de un charco usado para proveer agua a ganado y animales silvestres.	37
Figura 11. Ejemplo de un sistema de captación a nivel piso.....	38
Figura 12. Aspecto de un sistema ITDG (Velasco, 1991)	39
Figura 13. Esquema del sistema LT (Velasco, 1991).....	40
Figura 14. Sistema de Cosecha utilizando una bolsa almacenadora (Lauritzen, 1961)	41
Figura 15. Sistema BC (Velasco, 1991).	42
Figura 16. Diagrama del sistema Vecar 500,000 L (Velasco, 1991).....	43
Figura 17. Esquema de un sistema con Tajamar (Nosetto <i>et al.</i> , 2012).	45
Figura 18. Tajamar con tanque australiano (OAS-UNEP-IETC, 1997).....	50
Figura 19. Tajamar con reservorios elevados (Nosetto <i>et al.</i> , 2012).	50
Figura 20. Vista de un Jagüey (Jaquez, 1982).....	51
Figura 21. Bordo homogéneo (Velasco, 1991).	54
Figura 22. Bordo de núcleo impermeable (Velasco, 1991).	55
Figura 23. Bordo delantal (Velasco, 1991).	55
Figura 24. Bordo con diafragma (Velasco, 1991).	56
Figura 25. Bordo con núcleo y zanja (Velasco, 1991).....	56
Figura 26. Bordo con núcleo y prolongación (Velasco, 1991).	57
Figura 27. Secciones longitudinales de las estructuras de (a) presa subterránea y (b) presa de almacenamiento de arena (Foster y Tuinhof, 2004).....	59
Figura 28. Presas subterráneas elaboradas con diferentes materiales.	60
Figura 29. Estructuras de una presa de almacenamiento de arena.	61
Figura 30. Esquema de un sistema de riego mediante acequias (Vera, 2005)	62
Figura 31. Esquema de sección longitudinal de un qanat (National Academy of Sciences, 2001) ...	64
Figura 32. Ejemplo de un pozo.....	70
Figura 33. Ejemplo de un sistema cosechador de agua de lluvia (FAO, 1976).....	77
Figura 34. Colocación de la capa de grava (Frasier y Myers, 1983)	78

Figura 35. Aplicación de cera parafina sobre la superficie de contribución o captación (Frasier, 1975).	79
Figura 36. Aplicación de la emulsión asfáltica con una base de fibra de vidrio (Frasier, 1975).	79
Figura 37. Ejemplo de una bolsa para almacenamiento de agua (bolsa cisterna).....	83
Figura 39. Capa de polistireno usada para reducir las pérdidas por evaporación.....	103
Figura 40. Aspecto de la camanchaca en el Desierto Chileno.....	111
Figura 41. Esquema de un captador de niebla plano (Estrela <i>et al.</i> , 2008).	112
Figura 42. Ejemplo de un captador de niebla cilíndrico (Corell <i>et al.</i> , 2011).	113
Figura 43. Cepas en distribución espacial a tres bolillo (INE, 2007).....	135
Figura 44. Diseño espacial de zanjas trincheras (Cardoza <i>et al.</i> , 2007).	136
Figura 45. Sistema saucedado uno (INIF modificado por Pimentel, 2007)	137
Figura 46. Sistema saucedado dos (INIF modificado por Pimentel, 2007).....	138
Figura 47. Sistema español. A) vista superior, b) corte lateral (INE, 2007).....	139
Figura 48. Sistema Nezahualcóyotl (Pimentel, 2007)	140
Figura 49. Sistema gradoni, vista lateral con corte (INE, 2007).	141
Figura 50. Sección transversal de una terraza individual (Cardoza <i>et al.</i> , 2007).	143
Figura 51. Vista de un jagüey en el Valle de Tehuacán (Stirton, 2009) (izq.) y aspecto general de un jagüey (dcha.).....	147
Figura 52. Jagüey con desarenador en Epazoyucan, Hidalgo (Galindo, 2006).....	151
Figura 53. Panorama de un aljibe.....	152
Figura 54. Aspecto de la Presa San José, San Luis Potosí.....	154
Figura 55. Vista de una presa mediana.	155
Figura 56. Túneles horizontal y vertical de una galería en Tehuacán, Puebla.	164

Índice de Anexos

Anexo 1. Mapa de precipitación promedio anual de las zonas áridas, semiáridas y secas del país...A
--

RESUMEN

Desde los inicios de la humanidad la escasez de agua en zonas áridas ha sido un problema para sus habitantes, condición generada principalmente por la errática y mal distribuida precipitación que caracteriza a esas regiones. No obstante diversas civilizaciones antiguas se han desarrollado gracias al amplio manejo del agua que implementaron durante muchos años, que incluye por supuesto a la cosecha de agua de lluvia. Las condiciones actuales del recurso agua, revierten interés en estas técnicas, por lo que una monografía sobre las técnicas de cosecha de agua de lluvia que se han empleado en diferentes partes del mundo y en México, suele ser una obra de gran interés para diversos sectores de la población. Por otra parte, las obras para la cosecha de agua de lluvia dependen de la precipitación media anual de la región donde se pretende implementar, es así que para tener un sistema más eficiente se han estudiado diferentes materiales que ayudan a aumentar el escurrimiento superficial y a reducir las pérdidas por infiltración y evaporación, existiendo gran variedad para una adecuada elección. Cabe mencionar que además de estas técnicas existen otras no convencionales para la cosecha de agua, que pueden contribuir al abastecimiento de agua, asimismo es imprescindible complementar estas obras con técnicas para la conservación del agua.

Palabras clave: Cosecha de agua, zonas áridas, manejo del agua, escasez, conservación de agua.

ABSTRACT

Since the beginning of mankind, water scarcity in arid land has been a problem for residents, condition generated mainly by the erratic and poorly distributed rainfall that characterizes these regions. However several ancient civilizations have developed successful methods for water management, which of course includes harvesting rainwater. The current conditions of water resources, reverse interest in these techniques, so that a monograph on techniques for rainwater harvesting have been used in different parts of the world and in Mexico, is often a work of great interest to various sectors population. The method to harvest rainwater depend on the annual rainfall in the region where you intend to implement, so that to have a more efficient system we have studied different materials that help increase surface runoff and reduce infiltration losses and evaporation, there are a great variety for proper choice. It is worth mentioning that besides these there are other unconventional techniques to harvest water, which can contribute to water harvesting, is also important to supplement these works with techniques for water conservation.

Key words: Water harvesting, arid land, water management, shortage, water conservation.

1. INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por recibir una escasa y mal distribuida precipitación; lo que se traduce en problemas de abastecimiento de agua para la población que las habita. Una adaptación del hombre ante esta situación lo constituye el pastoreo nómada, que es una excelente alternativa cuando la población humana es reducida y existen grandes extensiones de terrenos disponibles para pastorear; ya que es una de las principales causas de la desertificación cuando la población aumenta y, por consiguiente, se recurre al sobrepastoreo de las áreas disponibles a fin de poder mantener la suficiente cantidad de ganado para abastecer adecuadamente la creciente demanda de satisfactores. Por otra parte, otra alternativa es el desarrollo de métodos que permitan utilizar el reducido suministro de agua de manera más eficiente a fin de cubrir los requerimientos domésticos, agrícolas e industriales.

En este sentido, desde tiempos remotos los habitantes de las zonas áridas y semiáridas del mundo han generado, gracias a su ingenio, habilidad y paciencia, numerosos métodos tendientes a coleccionar, almacenar y conservar el agua de lluvia. Estos métodos están basados en conocimientos empíricos; inicialmente se construían utilizando técnicas, herramientas y materiales muy rudimentarios por lo que era necesario invertir una gran cantidad de trabajo para su construcción y mantenimiento, motivo que provocó que muchos de ellos fueran sustituidos por técnicas más modernas o simplemente fueran olvidados y abandonados.

La acelerada explosión demográfica de las últimas décadas ha provocado un significativo incremento en la demanda de agua por parte de todos los sectores económicos, hecho que cobra una importancia mayor en las zonas áridas y semiáridas. Ante esta situación ha revivido el interés por los métodos practicados desde hace mucho tiempo en dichas zonas del mundo para manejar y aprovechar el agua de lluvia, ya que ellos representan una buena alternativa dado que otras fuentes de suministro de agua, como los pozos profundos, la transferencia interregional de agua, los métodos de desalinización de agua de mar y el

aprovechamiento de iceberg son muy costosas y algunos de ellos solo se han implementado a nivel experimental. Por otra parte, los avances realizados, gracias a investigaciones recientes, así como la disponibilidad de nuevos materiales, han permitido reducir considerablemente la cantidad de trabajo requerido para la construcción y mantenimiento de los sistemas de colecta, almacenamiento y conservación de agua de lluvia.

Además de las difíciles condiciones ambientales, en las zonas áridas y semiáridas en México existen graves problemas de índole social. Toda la problemática que padece una nación subdesarrollada se muestra con todo su rigor en las comunidades que habitan estas regiones; la escasez de recursos naturales acentúa los problemas de nutrición, salubridad y vivienda; asimismo la falta de medios de comunicación adecuados limita el rendimiento de los servicios, especialmente el educativo. En muchos casos, los pobladores de estas zonas pertenecen a una cultura autóctona, por lo que se consideran marginados, perseguidos, explotados y erosionados de sus mejores componentes. La psicología de ellos, es la de quien tiene sobrados motivos para estar a la defensiva, tratando de evitar los cambios que tradicionalmente, les han sido perjudiciales, pero a la vez creando y conservando una vigorosa cultura adaptada a las difíciles condiciones del medio que habitan (Soler, 1968).

Muchos de los métodos desarrollados para colectar, almacenar y conservar el agua de lluvia han dado excelentes resultados en muchos países, incluyendo México. Desafortunadamente, en nuestro país no han tenido la difusión adecuada, por lo que no se utilizan de manera masiva, aunque representen una buena alternativa para satisfacer las necesidades domésticas, agrícolas e inclusive industriales de agua.

En el presente trabajo se presenta un análisis y discusión sobre los métodos de colecta, almacenamiento y conservación del agua de lluvia que se han desarrollado e implementado en las diferentes zonas áridas y semiáridas del mundo.

2. OBJETIVOS

- Elaborar un compendio sobre los métodos de cosecha de agua de lluvia más utilizados en el mundo.
- Describir los métodos más comunes de cosecha de agua de lluvia implementados en la zona centro del país.

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo se realizó mediante una recopilación bibliográfica de diferentes partes del mundo y del país sobre los métodos de colecta, almacenamiento y conservación de agua de lluvia que se han implementado en diversas zonas áridas y semiáridas.

Asimismo, se seleccionaron las obras más representativas de la zona centro del país para su descripción detallada en base a observaciones directas y consulta bibliográfica.

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. Definición y localización de las zonas áridas y semiáridas

Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por recibir una escasa y errática precipitación. Sin embargo, García (1978) menciona que “el clima es el factor fundamental que origina la aridez y condiciones, de un modo diferente al de las zonas húmedas, el desarrollo de las geoformas, la vegetación, los animales, los suelos y consecuentemente, los hábitos y actividades del hombre”. La escasa información estadística sobre las zonas áridas y semiáridas, motivadas por su baja densidad de población, ha originado diferentes formas de expresión de la aridez.

Al respecto Georges Drophim, cuya experiencia parece haber sido sólo en el Norte de África, considera que la clasificación de las zonas húmedas, semihúmedas y áridas no es fácil ni rápida, ya que es necesario considerar una serie de condiciones climáticas, edáficas y ambientales, aunque acepta que el factor principal es la lluvia, y propone las siguientes definiciones: zona húmeda, es aquella con una precipitación media anual mayor a 500mm; zona semiárida la que recibe entre 100 y 500mm y la zona árida la que recibe menos de 100mm anuales (Noriega, 1974). Como puede observarse, estas definiciones difícilmente se aceptarían en México, donde nadie considera como zonas húmedas, gran parte de los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Chihuahua, Durango, Coahuila y Aguascalientes donde la precipitación supera los 500mm anuales.

En otro sistema de clasificación se considera que las zonas áridas son aquellas donde la precipitación pluvial es deficiente: menos de 250mm anuales son desérticas, comprendiendo, a grandes rasgos, los climas BW y BS del sistema climatológico de Köppen. Localizadas en un mapa, las zonas áridas del mundo se verán concentradas entre los 20 y 40 grados de latitud, tanto del hemisferio Norte como del Sur: las zonas áridas de América del Norte, Norte de África, Asia Menor, Asia Central y La India rivalizan con las zonas áridas de América del Sur y Australia (Rojas, Gonzalez y Reyes, 1968).

García (1983) considera que por la situación de México con respecto a la zona subtropical de alta presión y a la orientación general de sus principales sierras, existen grandes áreas con climas muy secos o desérticos BW y con climas esteparios o secos BS. Al respecto menciona:

“los climas muy secos BW se localizan en la parte norte de la Altiplanicie Mexicana a altitudes menores a 1500 m, así como en la porción de la llanura costera del Pacífico situada al norte del paralelo 25° N y en las zonas litorales de la Península de Baja California exceptuando el extremo Noroeste en donde el clima es Bs.

Los climas secos o esteparios Bs se encuentran bordeando a los primeros en la parte norte de la Altiplanicie, así como en los declives de la Sierra Madre Occidental que se eleva de la llanura costera del Golfo de California, y en la parte norte de la llanura costera del Golfo de México; se extiende además, en las zonas interiores del centro y sur del país que se encuentran menos expuestas a la acción de los vientos húmedos del mar, como sucede en algunas porciones de la parte sur de la Altiplanicie y en las regiones más bajas de la Cuenca del Balsas, así como en las cuencas altas de los ríos que surcan profundamente de la región de la Mixteca; hay otra pequeña zona de clima BS en el extremo Noroeste de la Península de Yucatán”.

Las zonas áridas y semiáridas también han sido definidas por las formaciones vegetales, en base a sus mecanismos de defensa a la sequía, por el tipo de drenaje endorreico, es decir de cuencas cerradas que no descargan en el mar sino en un lago y por la distribución de sus suelos “pedocales” (denominación de la antigua clasificación americana para suelos de zonas áridas y semiáridas que presentan un depósito de carbonatos solubles en la base de la capa húmeda, cuya profundidad varía con la pendiente y la aridez), sin embargo, la presencia de suelos azonales y de suelos que se han formado bajo condiciones climáticas diferentes a las actuales, hace difícil la delimitación (García, 1978).

De acuerdo a CONABIO (2008) el 49.2 % del territorio nacional está conformado por tierras secas, de las cuales el 0.2 % son zonas hiperáridas, 28.3% zonas áridas,

23.7% zonas semiáridas y 17.6% son zonas subhúmedas secas; extendiéndose por los estados de Baja California Norte, Baja California Sur, Chihuahua, Durango, Sonora, Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Nuevo León, Tamaulipas, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala (Figura 1).



Figura 1. Distribución de las zonas áridas en la República Mexicana (CONABIO, 2008).

La vegetación en estas áreas se caracteriza por matorrales xerófilos, pastizales y bosques espinosos. El número de personas que habitan en estas zonas del país asciende aproximadamente a 22 millones; por lo que el principal impacto en este tipo de hábitat es a causa de actividades humanas como la ganadería y la agricultura, así como la extracción de numerosas plantas del desierto (CONABIO, 2008).

Debido a las diferencias existentes entre los diferentes sistemas de clasificación para definir a las zonas áridas y semiáridas, en el presente trabajo se consideran como zonas áridas aquellas donde la precipitación promedio anual sea inferior a 500 mm, la cual es insuficiente para la producción de cosechas, a menos de implementar algún método para proporcionar agua adicional a los cultivos, por su parte, las zonas semiáridas reciben una precipitación promedio anual entre 500 y 1000 mm, suficientes para producir ciertos cultivos adaptados a estas condiciones con un grado razonable de seguridad (SRH, citada por Noriega, 1974).

4.2. Breve Reseña Histórica De Las Actividades Humanas En Las Zonas Áridas

Aunque no se ha precisado la exactitud de la época en que apareció el hombre sobre la tierra, algunos autores mencionan que sucedió hace más de un millón de años (Luelmo, 1975; Bowden, 1978 y Heiser, 1981, citados por Gallegos, 1985). Ellos señalan que los grupos primitivos eran pequeños, estaban aislados y tenían el problema de aprender a manejar y utilizar los recursos que la naturaleza les brindaba, teniendo que adaptar su forma de vida con forme a las condiciones ambientales, lo que aseguró su existencia y dispersión por todo el planeta. Al adaptarse a las diferentes condiciones del medio.

Antes del descubrimiento de la ganadería y la agricultura, los grupos humanos basaban su existencia en la caza, pesca y recolección de especies vegetales silvestres. En su lucha por sobrevivir, el hombre no dejó sin colonizar a las zonas áridas del suroeste asiático y en áreas similares del Nuevo Mundo. De las evidencias presentadas al respecto es posible inferir que las aldeas más antiguas con evidencias de agricultura incipiente se establecieron en áreas elevadas, donde la lluvia fue suficiente para producir cosechas de secano (Gallegos, 1985).

Con el incremento de la población en los asentamientos humanos establecidos, la producción agrícola se extendió hacia las regiones semiáridas, lo que motivó la implementación y desarrollo de los sistemas de riego. Estos sistemas vienen a constituir una respuesta tecnológica básica ante las condiciones ambientales adversas, además de implicar un cierto grado de organización social (Gallegos, 1985).

Aparte de los sistemas de riego, en la expansión de la agricultura hacia las zonas áridas, el hombre contó con nuevos conocimientos y herramientas más eficientes, lo que le permitió tener excedentes de producción, con el consiguiente desarrollo de minorías no dedicadas a las labores agrícolas que constituyen las clases dominantes. Otro invento importante es la escritura, que permitió perpetuar los conocimientos adquiridos a través de la palabra escrita.

En las zonas áridas la producción de cosechas sin riego es tan antigua como las producidas a base de riego. Ambos tipos de producción han servido para satisfacer las necesidades de poblaciones relativamente grandes, pero también han estado expuestas a bajas producciones, desastres ecológicos y han ocasionado hambre, uno por la destrucción del recurso suelo a través de prácticas culturales inapropiadas y el otro por deterioro del ambiente edáfico por la anegación y el incremento en la salinidad. Al respecto existen, desafortunadamente, muchos ejemplos.

La domesticación y cría de ganado es otra actividad que el hombre ha practicado desde tiempos muy antiguos dentro de las zonas áridas. En contraste con los riesgos y desastres propios de la agricultura practicada en estas áreas, los pastores nómadas lograron, aparentemente, un mejor balance con el ambiente. Sus rebaños los abastecen de alimentos y materiales para vestirse y abrigarse, además de evadir fácilmente los caprichos del clima árido mediante movimientos estacionales en busca de agua y pastura.

Podemos decir que este sistema pastoril ha sido un método eficiente de uso del suelo; sin embargo, el precario balance mantenido por el pastor nómada con su ambiente a lo largo de muchos siglos, en los cuales los grupos humanos dedicados a esta actividad eran relativamente pequeños y disponían de extensas áreas, ha sido roto por las restricciones impuestas por los diferentes gobiernos que comprenden las zonas áridas. Además, como resultado de mejores servicios sanitarios, apertura de modernas vías de comunicación, etc., la población de los grupos nómadas ha aumentado significativamente, lo que ha provocado el incremento en los rebaños y, por consiguiente, muchas áreas han sufrido los efectos del sobrepastoreo que puede conducir a una degradación irreversible de los recursos naturales (desertificación).

Otras actividades económicas realizadas por los habitantes de las zonas áridas son: cría y aprovechamiento de fauna silvestre, explotación de yacimientos minerales y de combustibles fósiles (petróleo, gas natural, etc.); establecimiento de centros industriales y urbanos, y el desarrollo de centros turísticos.

4.3. El uso del suelo en las zonas áridas de México

Antes de la llegada de los españoles, las zonas áridas del norte de nuestro país estaban habitadas por pueblos indígenas que basaban su sustento en la caza y recolección. A estos pueblos se les denominaba como “chichimecas”, término que se aplica a todo grupo náhuatl en estado de barbarie, aunque también se usa para designar, de modo específico, el pueblo que invadió Tula, destruyendo a la civilización Tolteca. Los grupos chichimecas estaban formados por individuos que no llevaban otro vestido que cueros abobados de fieras, manejaban hábilmente el arco y la flecha, presentaban una tecnología muy primitiva y habitaban en chozas humildes y cuevas (Alvear, 1968). Además, apenas si conocían los rudimentos de la agricultura, vagaban en pequeños grupos y practicaban la guerra de guerrillas. Gracias a su habilidad guerrera lograron detener todo intento de conquista realizado por los pueblos mesoamericanos. Sin embargo, a mediados del siglo XVI, después de la caída de Tenochtitlán, los conquistadores españoles descubrieron ricos yacimientos de plata en Zacatecas. Powell (1977) señala que la colonización hacia el norte se hizo siguiendo la llamada “faja de plata”, que va desde Zacatecas hasta Chihuahua. Para satisfacer las necesidades alimenticias de los centros mineros establecidos en esta región, se establecieron en los lugares ecológicamente más favorables, pequeñas áreas donde se cultivaba maíz, trigo y otros cultivos. De manera simultánea se implementaron ranchos ganaderos que proveían animales para el trabajo, carne y otras necesidades. Sin embargo, a la llegada de los españoles, el uso y abuso del pastoreo en tierras no adecuadas para la agricultura convencional, produjo una erosión acelerada en los suelos que aún no habían sido utilizados por los indígenas; con ello se generalizó la erosión (de varias clases y grados) en vastas extensiones de las zonas áridas y semiáridas.

A fines del siglo XVI, se logró la pacificación general de los grupos nómadas del norte, se congregaron en “villas” bajo la custodia de misioneros y se acercaron con indígenas traídos de Tlaxcala y Michoacán, a fin de que se les sirvieran de instructores.

Con la decadencia de la producción minera, las actividades agrícolas recibieron un gran impulso, por lo que surgen las haciendas que modelaron la vida y tradiciones de grandes grupos rurales.

4.3.1. AGRICULTURA DE TEMPORAL EN REGIONES ÁRIDAS

Las lluvias escasas y discontinuas limitan el número de cultivos que pueden desarrollarse en zonas áridas. El cultivo de cereales es la principal fuente de sustento, con trigo y cebada en las áreas de lluvia invernales o maíz, sorgo y mijo en áreas de precipitación de verano.

La experiencia en cultivos de temporal en diversas regiones semiáridas del mundo, ha demostrado que debe evitarse la labranza de tierras de pastoreo en regiones que tienen una precipitación demasiado escasa para asegurar unas perspectivas razonables de cultivo.

Por otra parte, el principal problema de las regiones semiáridas es ajustar el sistema agrícola a una precipitación pluvial sumamente variable, de manera que pueda sacarse el máximo beneficio de los años que tienen buena precipitación y que los años de sequía no necesariamente provoquen hambre o colapso económico.

La rotación de las cosechas, la implementación de métodos adecuados de labranza, el uso de variedades mejoradas y adaptadas, y la aplicación de fertilizantes y protección de las cosechas, han demostrado aumentos notables en los rendimientos, incluso en las áreas con regímenes problemáticos de humedad.

Una alternativa que ha resultado ser muy efectiva, se basa en un sistema combinado de explotación agropecuaria integrado. La clave de este sistema consiste en una rotación entre leguminosas y gramíneas adaptadas a las condiciones semiáridas. En las estaciones de buena precipitación pluvial, las leguminosas y el rastrojo de la cosecha de cereales producen pastura para todo el año, en tanto que se siegan buenas cosechas de gramíneas.

Este sistema de cría de animales, aunado con el cultivo de cereales es ampliamente utilizado en las regiones secas de Australia, además de tener ventaja de que la cantidad de insumos necesarios es relativamente baja.

Las prácticas sencillas para conservar la humedad del suelo pueden aumentar la producción en las regiones semiáridas e incluso pueden evitar fracasos de cosechas. Investigaciones recientes demostraron que la cobertura del suelo con sustancias orgánicas que complementan las variedades mejoradas y la fertilización, aumentan considerablemente la producción de los cultivos.

4.3.2. RIEGO PRIMITIVO

En regiones áridas, la cantidad de agua de lluvia recibida en invierno es tan escasa que antes de la siembra los agricultores deben dar un riego para asegurar la germinación de la semilla y para que la planta disponga en los primeros momentos de su desarrollo vegetativo de la humedad suficiente. Por regla general, en casi todos los valles de regadío las precipitaciones caídas sobre su superficie constituyen una fuente poco importante de suministro de agua. El transporte del agua desde los manantiales de las montañas hasta los valles plantea a los habitantes de las zonas áridas problemas muy interesantes y a veces de complicada solución (Orson y Vaughn, 1985).

Anaya (1977) menciona a la agricultura “kair” como una forma primitiva de cultivos de riego. Desde tiempos inmemorables los hombres han cultivado granos y hortalizas en los terrenos adyacentes a los grandes ríos que cruzan los gigantescos desiertos de Asia central. El nombre kair proviene del nombre dado a las pequeñas fajas de suelo aluviales no salinos que tienen humedad del subsuelo. El riego se obtiene utilizando el agua de las corrientes superficiales mediante canales.

Aunque este método tradicional de riego se usa solo para cultivos en pequeña escala, es decir autoconsumo y el nivel de tecnología empleada es bajo, ha permitido sobrevivir durante mucho tiempo a los pueblos que habitan en estas regiones.

Así mismo, en México y en Perú, las culturas autóctonas estuvieron basadas en la necesidad de organizar sistemas de riego, lo que causó el desarrollo de la agricultura sedentaria.

Por otra parte, el riego aumenta los peligros causados por las plagas y favorece la proliferación de enfermedades; los suelos frágiles que son típicos de las regiones áridas se degradan fácilmente bajo el riego, los niveles freáticos que suben hacia la superficie y la acumulación de sales, ponen en peligro la base misma de la agricultura. Así, muchos programas de riego han fracasado desastrosamente cuando no han adoptado las necesarias medidas de precaución.

4.4. El recurso Agua

El aumento de las demandas de agua es mucho más considerable en las regiones áridas que en las húmedas, por dos motivos principales: a) el agua es el recurso limitante en las regiones áridas y, por lo tanto, determina el grado en que puede desarrollarse otro recurso y, b) un aumento en la demanda de agua es concomitante con un aumento en el nivel de vida.

Las presiones demográficas y las necesidades del desarrollo por lo general han dado lugar a una situación en la cual el desarrollo de un nuevo recurso hidráulico es posible con mayor frecuencia solo a expensas del suministro de agua previamente disponible.

La escasez de agua en las regiones áridas no necesariamente implica una falta de recursos hidráulicos. En muchas de las regiones áridas existen recursos hidráulicos potenciales que podrían desarrollarse con los fondos y técnicas necesarias. Siendo que en los países en vías de desarrollo que se hallan en las regiones áridas, el mayor volumen del agua disponible se utiliza para el riego.

4.4.1. PRINCIPALES RECURSOS HIDRÁULICOS

El agua se puede adquirir tanto de fuentes superficiales, ríos, lagos, mares; como también de fuentes subterráneas mediante pozos. Así también, actualmente el tratamiento de aguas residuales se ha convertido en una alternativa de obtención de agua para uso agrícola, industrial y en algunos casos doméstico.

Las corrientes superficiales presentes en las zonas áridas son de tres tipos:

- a) Arroyos efímeros, que se originan dentro de la región,

- b) Arroyos que se originan en la vertiente, en estrecha proximidad con las tierras áridas, pero por lo general procedentes de alturas mayores dentro de la región, y
- c) Ríos perennes que se originan en los climas húmedos distantes y que corren a través de la región árida.

En las regiones áridas los manantiales con un flujo de agua copioso y continuo son relativamente raros. Los flujos de las corrientes que se originan dentro de la región por lo general son de naturaleza intermitente; los flujos torrenciales pueden ocurrir durante unos cuantos días o incluso horas, para que los sigan periodos largos durante los cuales el lecho de la corriente está completamente seco.

Los elementos que caracterizan a los sistemas fluviales en zonas áridas son los conos aluviales, las planicies de inundación, y los arroyos. Los conos aluviales son sistemas en forma de cono que consisten en material sedimentario no consolidado que se acumula en la boca de un río de montaña que descarga en otro, siendo más grandes estos conos que los formados en otras zonas climáticas (Salas, 2000).

Las planicies de inundación generalmente cuentan con poca pendiente, no aparentan rasgos claros de canales de escurrimiento definido, siendo que cuando llegan avenidas provenientes de los ríos de montaña, el flujo de agua se expande lateralmente pudiendo alcanzar varios kilómetros de ancho. Los arroyos son ríos efímeros por donde discurren torrentes que ocurren esporádicamente, causados comúnmente por tormentas convectivas que ocurren en ciertas épocas del año, por lo que usualmente están secos en el resto del tiempo (Salas, 2000).

4.5. El Ciclo Hidrológico y el Manejo del Agua de Lluvia

En esta sección se describirá el ciclo hidrológico, señalando los principios en que se basa la colecta, almacenamiento y conservación del agua de lluvia. De esta manera se estará en condiciones de comprender más adecuadamente, los principios en que se fundamentan los métodos desarrollados al respecto.

4.5.1. CICLO HIDROLÓGICO DENTRO DE LA BIÓSFERA

El ciclo hidrológico “se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida” (Fattorelli y Fernandez, 2011). El agua se mueve y transforma a cualquiera de los estados físicos de la materia; siguiendo diferentes trayectorias a través de la atmósfera, hidrósfera y litósfera (Figura 2).

La evaporación directa, la transpiración de las plantas y animales y la sublimación (paso directo del agua sólida a vapor de agua), dan paso al flujo del agua desde la superficie de la tierra hacia la atmósfera en forma de vapor de agua; la evaporación y transpiración (en conjunto llamadas evapotranspiración) son los fenómenos que generan el mayor movimiento de agua en el ciclo hidrológico. En este sentido, el vapor de agua es transportado por la circulación atmosférica y se condensa luego de haber recorrido distancias que pueden sobrepasar 1,000 km, dando lugar a la formación de niebla y nubes y, posteriormente a precipitación (Fattorelli y Fernandez, 2011).

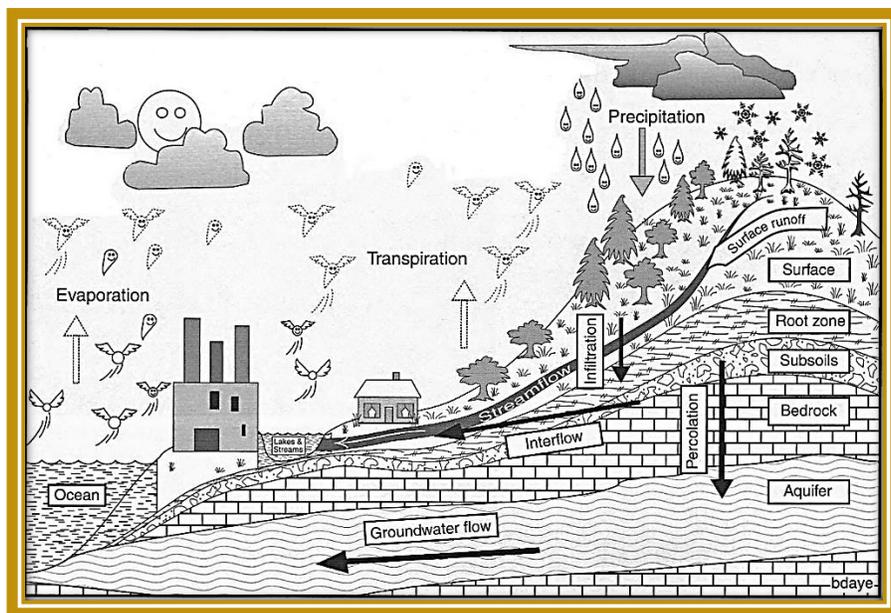


Figura 2. Ciclo hidrológico

Los procesos hidrológicos de la biósfera y sus efectos sobre la vegetación y tipos de suelo son de particular interés en el manejo de los recursos hídricos. La precipitación, infiltración, filtración, evaporación y transpiración puede verse

afectados, en forma positiva o negativa por las actividades realizadas por el hombre al manejar los recursos naturales. De la misma manera, el hombre puede alterar la magnitud de varios de los componentes relacionados con el almacenamiento del agua, incluyendo el agua retenida en el suelo, lagos, pantanos y ríos. En seguida se detalla el ciclo hidrológico.

4.5.1.1. Precipitación

Para que ocurra es necesario que se presenten tres condiciones atmosféricas:

- a) Una atmósfera saturada de vapor de agua;
- b) Presencia en la atmósfera de pequeñas partículas o núcleos que permitan la condensación o sublimación;
- c) Las partículas de agua o hielo se unan y aumenten de tamaño lo suficiente para que caigan por efecto de la gravedad.

La saturación es cuando se enfría la masa de aire hasta alcanzar la presión de vapor saturado o cuando se añade humedad a la masa de aire. Por lo general la precipitación ocurre cuando una masa de aire se enfría al elevarse y alcanza la presión de vapor saturado. Los sistemas de aire se elevan por sistemas frontales, efectos orográficos o por convección (Figura 3). Por ello se producen los siguientes tipos de precipitación:

➤ Precipitación frontal.

Ocurre cuando dos masas de aire de diferentes temperaturas e índices de humedad se ponen en contacto debido al movimiento general de la atmósfera y el aire se eleva en las superficies frontales. Un frente frío resulta de una masa de aire frío que reemplaza y eleva una masa de aire caliente; un frente cálido se debe a un proceso inverso. Los frentes fríos se caracterizan por lluvias de gran intensidad relativamente breves, y generalmente son de menor extensión que los cálidos.

➤ **Precipitación orográfica.**

Ocurre cuando una masa de aire se ve obligada a elevarse para poder pasar por encima de una cadena montañosa. Al elevarse, un mayor volumen de la masa de aire alcanza la presión de vapor saturado causando un aumento de la precipitación conforme aumenta la altitud. Una vez que la masa de aire pasa por las montañas se produce un descenso y calentamiento del aire, produciendo una falta de lluvia a sotavento de las montañas.

➤ **Precipitación Convectiva.**

Resulta del excesivo calentamiento de la superficie terrestre. Una elevación se produce cuando el aire más cercano a la superficie se calienta más que el aire que está encima. Al elevarse el aire y producirse la condensación, el calor latente de vaporización es liberado, añadiendo más energía a la masa de aire y elevándolo más. El aire elevado rápidamente puede alcanzar grandes alturas, en donde las gotas de agua se congelan y forman granizo, que cae mezclado con la lluvia. Estos tipos de precipitación son las más severas que existen, ya que se caracterizan por lluvias de gran intensidad y de corta duración que caen bajo áreas bastante reducidas. Igualmente, pueden darse varias tormentas de truenos sobre una extensa área que pueden causar inundaciones por avenidas de agua.

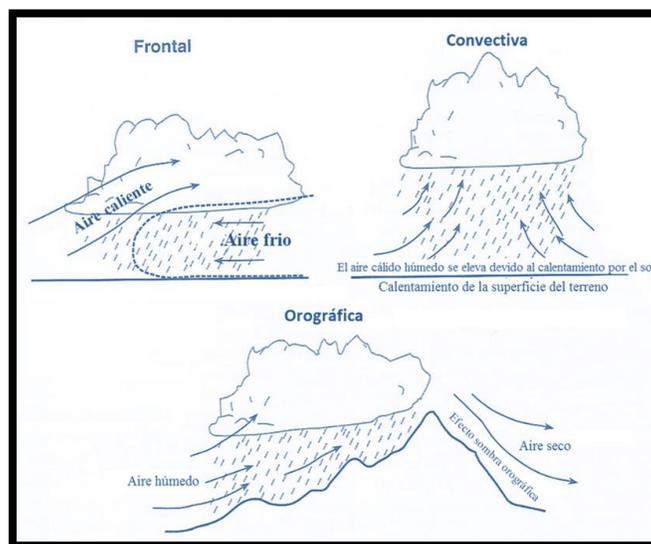


Figura 3. Precipitación frontal, convectiva u orográfica.

4.5.1.2. Intercepción.

Una vez producida la lluvia, el tipo, cantidad y condición de la vegetación influye, en gran medida, en el lugar y cantidad de lluvia que llega a la superficie del suelo. Los densos bosques de coníferas de las latitudes nortes y las múltiples capas de vegetación de los trópicos pueden atrapar y retener gran cantidad de agua de lluvia, la cual finalmente se evapora. En los trópicos es muy probable que más del 70% del agua de lluvia anual sea interceptada. Las hierbas, por su arte, interceptan del 10 al 20% del total de la lluvia.

No toda la precipitación que queda atrapada por la vegetación es devuelta a la atmósfera. Mucha de ella gotea por las hojas o se desliza por los tallos hasta llegar al suelo. Así también, no toda la precipitación que penetra las capas forestales puede llegar a formar parte del agua del suelo o del agua de los escurrimientos superficiales. Los restos vegetales que están sobre la superficie del suelo pueden almacenar gran cantidad de agua.

En la mayoría de los estudios sobre presupuestos de agua, la pérdida por intercepción es un importante concepto del almacenamiento que debe de restarse al total de la precipitación. El resultado es la “precipitación neta”, o sea la cantidad de agua con la que efectivamente disponemos para satisfacer los déficit de agua del terreno o para fluir sobre la superficie, subsuperficialmente o subterráneamente.

4.5.1.3. Movimientos del agua al entrar y cruzar la tierra

El grado con que el agua penetra la superficie de la tierra depende de las condiciones y características físicas del terreno. Los restos vegetales del suelo influyen sobre la cantidad y el índice de movimiento del agua al entrar sobre la superficie de la tierra. Los restos vegetales forman dos capas con características hidrológicas distintas:

- Un horizonte superior compuesto por hojas, tallos y otros materiales vegetales no descompuestos.
- Un horizonte inferior de material vegetal descompuesto y que, en gran medida, funciona como tierra mineral.

El horizonte superior protege al suelo de la energía del impacto de las gotas de lluvia, que pueden desplazar a pequeñas partículas de suelo provocando erosión; también impide la formación de desagües superficiales, minimizando el flujo de aguas superficiales. El horizonte inferior tiene una gran capacidad de almacenamiento. Los restos vegetales son importantes tanto para el almacenamiento como para proteger al suelo, así como para mantenerlo en un estado “abierto” que facilite y promueva altos niveles de infiltración.

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra dentro de la superficie del suelo. Se produce como resultado de la combinación de las fuerzas de gravedad y capilaridad. Si colocamos agua en tierra seca de textura media, se observa un índice inicial de infiltración muy alto. Ello se debe a una fuerte atracción física de las partículas de tierra hacia el agua. Al pasar el tiempo y aumentar la cantidad de agua en el suelo, este índice llega a ser, eventualmente, constante. Por lo tanto, la infiltración será tan rápida como lo permita el índice de drenaje de la tierra bajo la influencia de la gravedad. El proceso de flujo del agua a través de la capa de tierra saturada motivado por las fuerzas de gravedad se llama “percolación”.

4.5.1.4. Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) incluye la evaporación producida en la tierra, en la superficie de las plantas, en las concentraciones de agua y la transpiración de las plantas. La transpiración difiere de la evaporación en que se lleva a cabo en los tejidos vivos de las plantas y está influenciada por las características biológicas de las plantas. La evapotranspiración tiene un gran efecto en las características en la producción de agua en una determinada zona, y está influenciada por las prácticas de manejo forestal y de agostaderos.

El proceso de evaporación es simplemente la pérdida neta de agua de una superficie por producirse un cambio en el estado físico del agua, que pasa de líquido a gaseoso. Los requisitos para generar evapotranspiración son:

- ✓ Un flujo de energía hacia las superficies de evaporación o transpiración;
- ✓ Un flujo de vapor de agua escapado de estas superficies;

- ✓ Un flujo de agua líquida hacia estas superficies.

Si uno o más de estos factores resulta alterado, se producirá un cambio en la correspondiente pérdida total de agua por evapotranspiración en la superficie. Las condiciones que controlan el flujo de energía por radiación, convección y conducción hacia las superficies de evaporación determinan la cantidad de energía disponible para el calor latente de vaporización. La reflectividad de la superficie de evaporación (albedo) determina la cantidad de radiación solar incidente que es absorbida por la superficie. La radiación solar absorbida más la radiación de onda más larga constituyen el total de la radiación neta de todo tipo de longitudes de onda de que se disponen para evaporar el agua o calentar el agua o el suelo. Cuando existe agua disponible, la mayor parte de esta radiación neta es utilizada en el proceso de evapotranspiración.

4.5.1.5. Desagües

Se refiere a los diversos procesos y caminos por medio de los cuales el exceso de agua pasa a formar parte de los caudales de los ríos. Estos excesos de agua representan el total de la precipitación que corre por la superficie del terreno y que desagua la tierra, no consumiéndose en la evapotranspiración. Parte de esta agua fluye rápidamente para integrarse a las corrientes de los ríos; otra parte toma caminos que tienen un tiempo de almacenamiento o retención que puede durar semanas o meses antes de que pasen a formar parte de las corrientes de los ríos.

Los ríos perennes generalmente están abastecidos por aguas subterráneas, que mantienen su caudal en la época de secas. Debido a las vías que sigue, el flujo de agua subterránea no representa incrementos repentinos en las corrientes de los ríos.

Cuando llueve o se derrite la nieve, numerosas vías adicionales de aguas superficiales alimentan los caudales de los ríos. El camino más directo de la lluvia hasta el caudal del río, es aquel en que la lluvia cae directamente sobre dicho caudal, lo que se llama "intercepción del canal". El desagüe superficial se debe a la presencia de áreas impermeables o a que el volumen de lluvia caída es superior a

la capacidad de infiltración del suelo. Parte del desagüe superficial queda retenido en la superficie del terreno produciendo, a pesar de ello, un rápido flujo de agua.

El flujo “subsuperficial” o “flujo intermedio” es aquella parte de la precipitación que se infiltra, pero que llega hasta el caudal del río dentro de un periodo de tiempo lo suficientemente corto como para que sea considerado como parte del flujo de una tormenta.

Hasta aquí se considera la parte del ciclo hidrológico, que es la parte que interesa para los fines del presente trabajo.

Por otra parte, para que las lluvias produzcan los máximos beneficios han de cumplir los siguientes requisitos:

- I. La cantidad de lluvia ha de ser suficiente para reponer la gastada en la zona radicular.
- II. su frecuencia debe ser tal que suministre humedad al suelo antes de que las especies vegetales padezcan por su falta.
- III. han de ser lo suficientemente intensas para dar tiempo al suelo a absorberlas.

4.5.1. DISPONIBILIDADES DE AGUA

Es probable que el suministro inadecuado de agua haya contribuido en gran medida en los desastres financieros y quiebras en muchos proyectos de riego. Las comunidades de regantes de las zonas áridas podrían ajustar más racionalmente, dentro de unos ciertos límites, sus turnos de riego sobre la base de una información verosímil de las existencias hídricas.

Para ello, se deben identificar las fuentes de disposición del recurso agua en la zona, y en base a ello ajustar los alcances de los proyectos. A continuación se describen de manera resumida las formas en que se encuentra disponible el agua en la superficie continental.

4.5.1.1. Agua atmosférica no procedente de precipitaciones

En algunas zonas del oeste de Australia el rocío contribuye a la producción de pastos excelentes. También en el desierto de Néguev, que se encuentra al sudoeste del mar Muerto, el rocío proporciona la mayor parte de la humedad necesaria en verano para el desarrollo de las uvas, puesto que las escasas precipitaciones, que oscila entre 100 y 280 mm anuales, se ven contempladas por un número de noches de rocío que varía entre 100 y 250 mm anualmente.

Se han hallado en Néguev celosías de piedras dentro de las cuales se construían cepas para plantar árboles y que estaban construidas con el propósito de extraer de la atmósfera la cantidad de agua suficiente para el riego de las especies plantadas.

Además de la precipitación en algunos lugares, debido a las condiciones meteorológicas existentes, se forman grandes cantidades de reservas de agua en estado de sobresaturación de humedad más comúnmente conocida como niebla.

No obstante, para que sea significativa esta fuente de agua tiene que cumplir con lo siguiente: 1) formación de rocío abundante; 2) nieblas y nubes, y 3) altura atmosférica. El agua que se evapora del suelo y las hojas reduce, en una magnitud semejante, el volumen de agua que hubiera sido extraído del suelo.

4.5.1.2. El agua subterránea

El agua subterránea es aquella que ocupa gran parte de los espacios vacíos del interior del terreno. Para que el agua subterránea contribuya plenamente al crecimiento de las especies vegetales, sin obstaculizarlo, es preciso que aquella se encuentre cerca, pero siempre debajo, de la zona de la cual se espera sea extraída el agua.

El subsuelo mexicano aloja gran número de acuíferos fuentes de agua que funcionan a la vez como vasos de almacenamiento, redes de acueductos y plantas de tratamiento naturales. Se han definido 653 acuíferos para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (CONAGUA, 2011).

4.5.1.3. Aforo de la nieve y ventajas que de él se derivan

Es preciso saber si el agua puede ser utilizada o no y en qué forma se producirá la escorrentía. Las ventajas que se derivan del aforo de la nieve, es que la red para su control ha experimentado una considerable expansión, lo que permite obtener datos de mayor precisión más rápidamente y con menores inconvenientes.

4.5.1.4. Pantanos

El agua que corre en invierno y primavera puede ser retenida en grandes depósitos hasta que se necesite para el cultivo. El almacenamiento se efectúa en los años húmedos para su utilización en los años secos.

Todas las presas deben estar provistas de aliviadores, de dimensiones suficientes para permitir la evacuación de las máximas riadas esperadas. La capacidad de un pantano viene fijada por las condiciones naturales del cañón o del valle en que el agua es almacenada y por la altura del dique. Los diques construidos para el riego varían entre aquellos que están construidos económicamente, cuya altura es de pocos metros, hasta las estructuras de más de 200 metros de altura con presupuestos de varios millones de dólares.

4.5.1. BALANCE DE AGUA

“El Balance Hidrológico relaciona las variables que intervienen en el ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento superficial, almacenamiento superficial y subterráneo y flujo de agua subterránea. Se aplica cuando se realiza una distribución de los recursos hidráulicos a nivel global, o en cuencas particulares” (Fattorelli y Fernandez, 2011).

El balance (equilibrio) de aguas es una simple aplicación del principio de conservación de masa al ciclo hidrológico: considerando una determinada cuenca de aguas pluviales y un cierto intervalo de tiempo, tenemos que:

Entrada de agua— Salida de agua = Variación del volumen de agua almacenada

Derivado de lo anterior, la ecuación general del Balance Hidrológico en una cuenca determinada es la siguiente (Fattorelli y Fernandez, 2011):

$$P-Q-G-ET=\Delta S$$

Donde: P es la precipitación en el período seleccionado.

Q es el caudal superficial que sale de la cuenca que se analiza.

G constituye el flujo neto de aguas subterráneas desde la cuenca hacia el exterior.

ET representa la evapotranspiración real en la cuenca.

ΔS es el cambio en almacenamiento superficial (en los cuerpos hídricos superficiales o en el manto nieve) y subterráneo (la fracción de agua en la zona no saturada del suelo y el acuífero). Incluye almacenamiento en cauces, embalses, suelo y acuíferos.

4.5.2. BASES PARA LA COLECTA, ALMACENAMIENTO Y CONSERVACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Los principios básicos de los métodos desarrollados de cosecha de agua de lluvia en las zonas áridas se basan en el aprovechamiento, manipulación e inducción de los escurrimientos superficiales mediante la construcción de obras que colecten, almacenen y conserven el agua que conducen. Debido a que la mayor parte de las lluvias que se presentan en estas áreas son de gran intensidad y poca duración, el suelo no es capaz de almacenar o infiltrar una gran cantidad del agua que precipita. La capacidad de infiltración del suelo es rápidamente superada, formándose en un lapso de tiempo relativamente corto, ríos torrenciales que conducen grandes volúmenes de agua, causando más daños que beneficios.

Otra forma de aprovechar el agua de lluvia, se basa en la utilización de los depósitos subterráneos de agua, que son recargados por el agua de lluvia que se infiltra a través de la superficie del suelo.

En base a estos principios, relativamente sencillos, el hombre ha logrado idear y desarrollar diferentes métodos que la han permitido sobrevivir, desde tiempos muy antiguos dentro de las zonas áridas, a pesar de la escasez del vital líquido.

4.6. Antecedentes sobre la cosecha de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas

Mediante detalladas y minuciosas observaciones realizadas durante muchas generaciones, los antiguos habitantes de la tierra llegaron a comprender y conceptualizar, aunque de manera empírica, las diferentes fases o procesos que implican lo que actualmente denominamos “ciclo hidrológico”. Los pobladores de las zonas áridas no fueron la excepción y gracias a esta serie de conocimientos desarrollaron una serie de métodos que les permitieron coleccionar, almacenar y conservar el agua de las escasas y mal distribuidas lluvias.

La práctica de la cosecha de agua de lluvia es ancestral. Se cree que esta técnica se utilizó por primera vez en Irak hace más de 5,000 años, en el Creciente Fértil, donde la agricultura comenzó aproximadamente 8,000 años a.C. (Hardan, 1975 citado por Ibraimo y Munguambe, 2007). Por otra parte, Velasco (1991) sostiene que al parecer la cosecha de agua de lluvia tiene sus inicios en el Desierto de Néguev, hace aproximadamente 4,000 años. Durante la época de la ocupación romana, estas granjas de escurrimiento (colección de agua de lluvia e irrigación de áreas situadas en las partes bajas) evolucionaron en sistemas relativamente sofisticados que cubrieron una gran porción de las tierras altas de Néguev. Existe además cierta evidencia de que sistemas de cosecha de agua menos complicados fueron usados por los indios del área del Valle de México, Valles Centrales de Oaxaca, el Valle del Yaqui en Sonora hace alrededor de 700-900 años.

Muchos de los pastizales y matorrales del Norte de México han sido clasificados ya sea como áridos, semiáridos o áreas con una corta temporada de agua, cuentan con un potencial para el uso de técnicas de cosecha de agua. Hay, de hecho, muchos ejemplos de técnicas para la cosecha de agua, que actualmente están siendo usados por diferentes secretarías del gobierno federal, campesinos, entre otros, para proporcionar agua al ganado doméstico o para el uso por la fauna silvestre. En el mundo, el desarrollo de estas estructuras ha recibido diversos nombres, los cuales incluyen el de trampas de agua, cuencas de captación, cuencas de drenaje asfaltadas, tanques falsos y bebederos. Términos adicionales

provenientes de Australia son los de caminos de captación y tanques en plano inclinado.

La importancia de esta actividad se pone de manifiesto si se considera que 10 mm de lluvia equivalen a 100,000 litros de agua por hectárea, a más de que se puede utilizar en regiones con precipitaciones pluviales tan reducidas como los 50 a 80 mm anuales en promedio, cabe destacar que los suelos arcillosos o equivalentes, son ideales para la instrumentación de este método, ya que después de una lluvia se forma una costra que incrementa su coeficiente de escurrimiento (National Academy of Sciences, 2001). En ocasiones, el escurrimiento puede colectarse por medio de las represas naturales, otras veces es necesaria la construcción de estanques en pequeñas depresiones, entre otras obras como las que a continuación se exponen.

5. SISTEMAS DE COSECHA Y ALMACENAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA

La cosecha de agua de lluvia ha sido utilizada principalmente para proveer de agua a pueblos pequeños, escuelas, viviendas, pequeños jardines, ganado y vida silvestre (National Academy of Sciences, 2001), en lugares donde la obtención del recurso agua es costosa por su carencia. A continuación se describe la naturaleza de la cosecha de agua de lluvia y se presenta un panorama de las diferentes técnicas empleadas para esta actividad.

5.1. Definición

La cosecha de agua es el proceso de coleccionar y almacenar el agua de la precipitación, desde un terreno que ha sido acondicionado para incrementar el escurrimiento de la lluvia y la nieve derretida (Myers, 1974).

Más recientemente, la cosecha de agua de lluvia ha sido definida como la recolección y concentración de agua de escorrentía, para usos productivos como la agricultura, ganadería, silvicultura, y el abastecimiento doméstico en zonas áridas y semiáridas (Fentaw *et al.*, 2002; Gould, 1999; Stott, 2001, citados por Ibraimo y Munguambe, 2007). Asimismo, TCEQ (2007) define la cosecha de agua como la práctica de recolectar el agua, producto de la lluvia, antes de que tenga la oportunidad de trasladarse a los ríos o quebradas o de infiltrarse al suelo y convertirse en agua subterránea.

Por otra parte, de acuerdo a FAO (1996) citada por FAO (2000), la captación de agua de lluvia se define como la recolección de escorrentía superficial para su uso productivo, y que puede lograrse de las superficies de tejados, así como de corrientes de agua intermitentes o efímeras. En este sentido, Hudson (1987) distingue entre conservación de suelos (labranza, terrazas, bordos y surcos), conservación de aguas, entendida como la captación y almacenamiento del agua donde cae (surcos, terrazas y derivación de agua e inundaciones) y captación (cosecha) de agua de lluvia, descrito con énfasis en el almacenamiento de agua para su utilización en otra parte, siendo una diferencia notable que para conservar

el agua se requiere prevenir la escorrentía, mientras que para captar el agua es necesaria un área con alta escorrentía (FAO, 2000).

Finalmente, diferentes autores han hecho clasificaciones de los sistemas de cosecha de agua de lluvia (Pacey y Cullis, 1986; Critchley, 1986; Matlock y Dutt, 1986; Bruins *et al.*, 1986; Boers and Ben-AsherOweis, 1982 citados por Reij, Mulder y Begemann, 1988; Hachum y Kijne, 1999; FAO, 2000 y Prinz, 1996), en base a diferentes criterios como; la fuente de agua, tipo de escorrentía, tipo de almacenamiento y los usos principales; para este monografía se considerarán las categorías de Critchley's (1986) citado por Reij, Mulder y Begemann (1988), donde la categorización se basa en las características de las áreas de captación y los componentes para el almacenamiento como en seguida se especifica:

1. Cosecha en techos, que se refiere a los sistemas donde el agua es captada por techos
2. Cosecha de escorrentía, es cuando se capta el agua de la escorrentía superficial y la de canales.
3. Cosecha de inundación, cuando se aprovecha el agua de caudales naturales.

Asimismo el autor considera dos formas de almacenamiento; una a largo plazo en reservas profundas de agua y otra a corto plazo sobre el mismo perfil del suelo.

Los sistemas de cosecha de agua de lluvia tienen las siguientes características: se practican en regiones áridas y semiáridas, donde la escorrentía superficial es intermitente; contemplan un área de captación y un área de almacenamiento, la cual puede ser constituida por el mismo perfil del suelo, pequeños depósitos, cisternas o acuíferos (Oweis, Hachum y Kijne, 1999).

5.2. Cosecha de agua en techos

En este sistema el agua de lluvia que cae al techo es captada y conducida mediante tuberías o canales a una cisterna de almacenamiento para su posterior aprovechamiento. En seguida se detallan las obras de cosecha de agua de lluvia mediante techos:

5.2.1. COSECHA POR MEDIO DE AZOTEAS O TEJADOS DE CASA

En muchas zonas áridas y semiárida del mundo se utilizan los techos de las casa para coleccionar el agua de lluvia. Es este un método barato, simple, sin potencial de desertificación y que representa una buena opción para obtener un suministro suplementario de agua. Si se logra combinar con un adecuado sistema de almacenamiento de agua este método puede resultar muy eficiente, ya que un mm de lluvia por metro cuadrado equivale a un litro de agua, por tener un coeficiente de escurrimiento muy cercano a uno, es decir, casi toda el agua que llueve y cae en techo escurre.

5.2.1.1. Almacenamiento en cisternas superficiales

El más común de estos almacenamientos es un tanque metálico con capacidad superior a los 200 litros o un tanque superficial diseñado en función de la demanda familiar o del grupo de familias o personas que habitan o usan el inmueble (Figura 4). Los tanques de almacenamiento, que se fabrican en el sitio, están revestidos en su interior por una cubierta de cemento, con el fin de evitar su deterioro y conservar la calidad del agua, por otro lado en el mercado existen tanques de capacidades variables desde los 400 hasta los 5'000 litros (Mundo *et al.*, 1997).

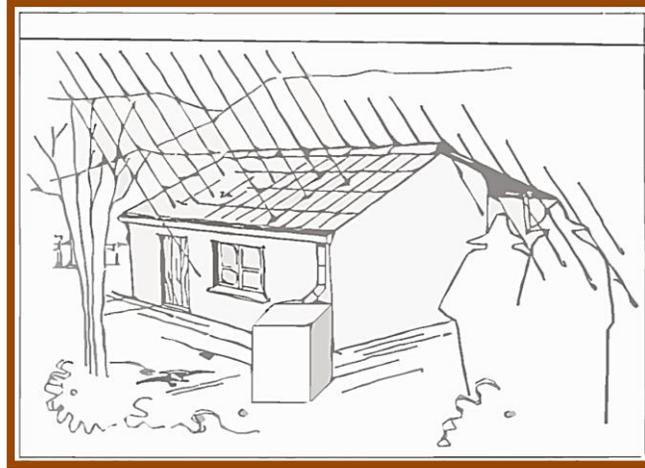


Figura 4. Recolección de agua de lluvia con cisterna superficial (Mundo *et al.*, 1997).

De acuerdo a Mundo *et al.* (1997) el sistema se compone de tres partes: área de captación, conducción y almacenamiento. La primera se refiere al techo de las viviendas, que pueden ser de asbesto, cemento, lámina o concreto. Debe de evitarse aquellos materiales que desprendan sedimentos, como la palma. La conducción se lleva a cabo mediante el sistema de tuberías que transporta el agua captada hacia el tanque de almacenamiento.

La conducción y suministro de la cisterna comúnmente se construye de tubería de PVC de seis pulgadas cortadas por la mitad en forma de canaletas. La canaleta se coloca en el borde del techo de la vivienda, aunque pueden usarse otros materiales.

El agua captada se puede usar para actividades humanas, no obstante no se debe utilizar como potable sino hasta antes haberla filtrado por algún sistema y clorado; además esto se puede hacer mediante filtros de arena y cloro casero.

5.2.1.2. Almacenamiento en cisternas subterráneas

La captación de agua de lluvia se hace en el propio techo de la cisterna, que puede ser de lámina, plástico o teja; también pueden utilizarse los techos de casas vecinas unidas a través de canaletas, esto para acelerar el llenado (Figura 5 izq.); aunque también la captación de agua puede llevarse a cabo únicamente por el techo y la cisterna puede estar completamente enterrada (Figura 5 dcha.) (Mundo *et al.*, 1997).

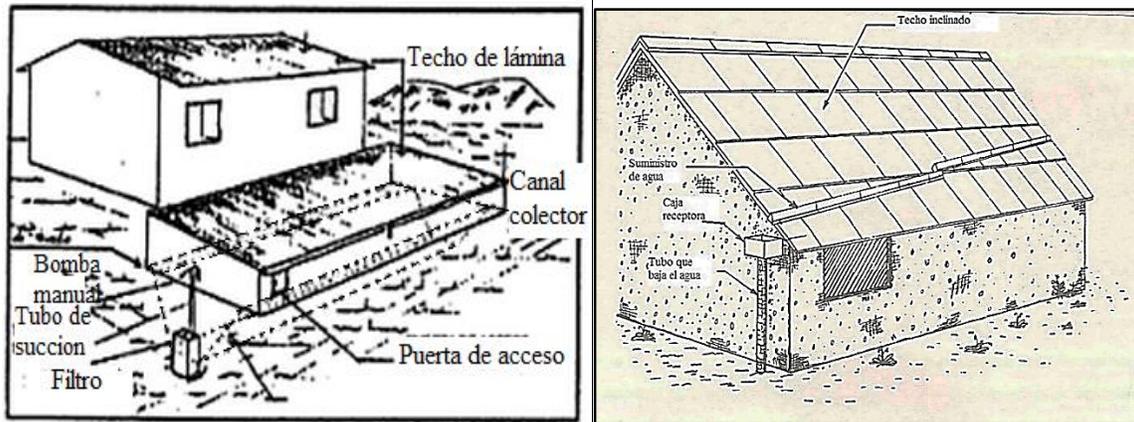


Figura 5. Cosecha de agua en techos con cisternas subterráneas (Mundo *et al.*, 1997)

La cisterna se excava en el suelo en forma de tronco piramidal invertido con la base menor en el piso o fondo de concreto; las paredes son revocadas con mezcla y reforzadas internamente con malla gallinera. El suministro de agua es por medio de una canaleta conectada a una tubería de PVC que conduce el agua a la cisterna, la cual cuenta con un filtro interno compuesto de capas de arena (50 cm de espesor), carbón vegetal (30 cm de espesor) y grava (20 cm de espesor).

Para extraer el agua de la cisterna comúnmente se usa una bomba manual, utilizando tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ " , esta a su vez conectada con otro tubo pero de 6" de diámetro, perforado en la parte inferior, y este último enterrado en un filtro de ladrillo que se construye en un extremo de la cisterna (Mundo *et al.*, 1997).

El agua debe quedar en completa oscuridad para evitar la proliferación de algas, asimismo deben construirse aireadores para la oxigenación del agua con tubos horizontales del lado del viento dominante y un eliminador de excedentes, y finalmente debe contar con una puerta para realizar su limpieza.

Además de lo citado párrafos arriba, a continuación se describen tres dispositivos para la cosecha de agua de lluvia en techos. Estos dispositivos requieren de menor trabajo de excavación que cualquier otro tipo, y son llamados también techos cuenca.

5.2.2. CASETA DE CONSTRUCCIÓN RÚSTICA (CCR)¹

Consiste en dos soportes verticales, que pueden ser de madera de huizache; sobre éstos, se arma una plataforma que se sujeta a los soportes por medio de unos tirantes; encima de la plataforma se instalan una o dos láminas, ya sea metálicas o de asbesto, las cuales serán el área de escurrimiento (Figura 6); la plataforma debe tener de 1 a 2 % de pendiente, para que el agua de lluvia escurra por las láminas y se conduzca a una canaleta, que a su vez conecta a un tubo que dirige el agua a recipientes de almacenamiento, mismos que se colocan en el piso debajo del techo (Velasco, 1991).

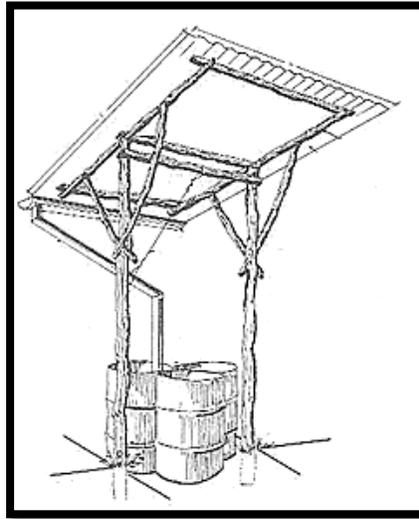


Figura 6. Aspecto de una caseta de construcción rudimentaria (Velasco, 1991).

Para este sistema, Velasco (1991) considera una eficiencia de 80%, puesto que el otro 20% lo constituye el agua que humedece la superficie y la salpicada. Además él establece una fórmula para calcular el volumen total cosechado durante un año, donde relaciona la superficie de escurrimiento con los datos de precipitación promedio anual registrados para la zona y el porcentaje de eficiencia, quedando expresada de la siguiente manera:

$$VT=0.80[PP(bL)]$$

Donde: VT: volumen total cosechado durante un año
0.80: porcentaje de eficiencia

¹ Publicado por Hernández R. citado por Velasco (1991)

PP: precipitación pluvial promedio anual expresada en metros

b: ancho del área de contribución

L: largo del área de contribución

5.2.3. TANQUE CUENCA (TACU)²

Este tipo de tanque es un recipiente cerrado que debe construirse sobre una base sólida, preferentemente sobre concreto armado de 10cm de espesor. Tanto la base como el resto de la unidad deben ser de material metálico, mismo que tiene que ser bien soldado por fuera y por dentro, Velasco lo describe de la siguiente manera:

En condiciones de semidesierto, los techos cuenca deben tener un radio mayor que la altura, ya que se necesita de una superficie de captación mayor para la escasa precipitación que se presenta en esas zonas. Este autor indica que los tanques cuenca se componen de los siguientes elementos (Figura 7):

- ⇒ Tapa con inclinación de 10 % para obtener un óptimo escurrimiento
- ⇒ Canal circular que rodea la tapa e intercepta al escurrimiento
- ⇒ Respiradero
- ⇒ Llave para la salida del agua
- ⇒ Fosa para colocar los recipientes a llenar de agua

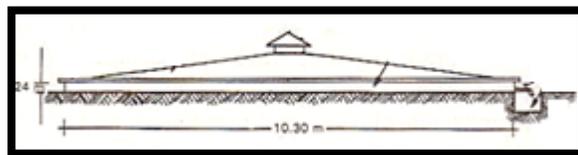


Figura 7. Tanque cuenca para regiones áridas (Velasco, 1991).

Para calcular el volumen captado por el TACU se sigue la misma relación utilizada para la CCR, donde se multiplica la superficie de captación (área de un círculo) por el dato de precipitación promedio anual de la zona, y el porcentaje de eficiencia, que para este caso se contempla también un 80 %.

² Ibídem

5.2.4. TECHO CUENCA (TC)³

Usado especialmente para cosechar agua destinada a consumo humano. Consta de dos secciones: el techo, que funciona como área de contribución y retardador de evaporación simultáneamente ya que inmediatamente abajo se localiza el tanque o sistema de almacenamiento.

El techo está formado por dos superficies que convergen en un canal central con pendiente inducida, el cual permite al agua colectada caer por gravedad a la cisterna a través de unas cajas con tamiz; sobre la pared externa de la cisterna se ubica un piezómetro para poder conocer el volumen de agua cosechado y almacenado; para conducir el agua se instala una válvula de paso junto con una tubería de conducción de cinco centímetros que termina en una llave para consumo humano (Figura 8) (Velasco, 1991).

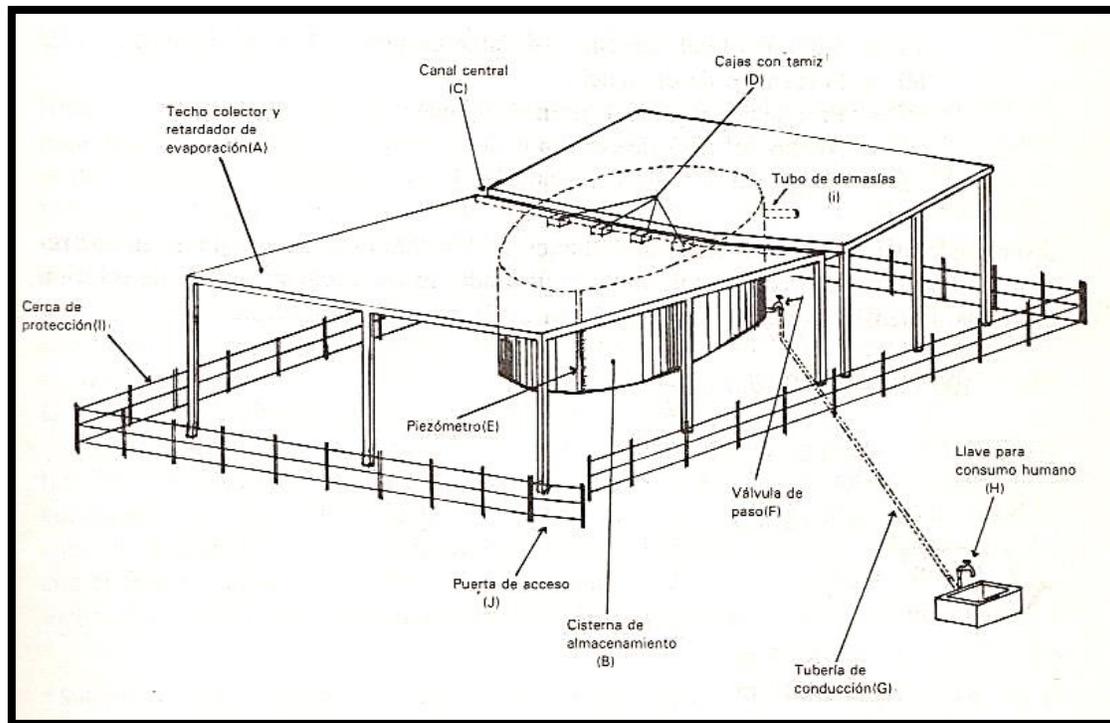


Figura 8. Techo cuenca apropiado para cosecha de agua pluvial para consumo humano (Velasco, 1991).

³ Diseñado por Pearson y colaboradores

Finalmente, Velasco (1991) señala que de acuerdo a mediciones realizadas este método de cosecha cuenta con una eficiencia de 88 % de agua pluvial interceptada, sin embargo insiste en seguir utilizando un valor de 80 % para los cálculos de volumen cosechado y dimensiones de las superficies colectoras. En este sentido, el autor plantea la misma fórmula utilizada para la CCR para el cálculo del volumen, además de considerar el cálculo del ancho del techo mediante el despeje de la fórmula del volumen, tomando en cuenta que $B=(1/2)L$ la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$L = \sqrt{\frac{2(VT)}{0.80(PP)}}$$

Donde: L: largo
 0.80: porcentaje de eficiencia
 PP: precipitación pluvial promedio anual expresada en metros
 VT: volumen total cosechado durante un año
 L: largo del área de contribución

5.3. Cosecha de esorrentía superficial

5.3.1. LAS CISTERNAS

Las cisternas son utilizadas desde hace miles de años para coleccionar y almacenar al agua de lluvia. Existen varios tipos, unas de ellas coleccionan en forma directa el agua de lluvia, mientras que otras sirven para almacenar el agua de los escurrimientos. Podría decirse que las cisternas se han utilizado desde los comienzos de la cosecha de agua de lluvia; se ha documentado que en el Desierto del Néguev en antiquísimos tiempos se usaron cierto tipo de cisternas de cielo abierto llamadas *cisternas israelitas*, que a su vez fueron evolucionando hasta dar paso a las cisternas de cámaras subterráneas construidas durante el siglo III (Velasco, 1991). También se sabe que en el tiempo de las encomiendas se practicaba la cosecha de agua de lluvia utilizando cisternas y techos captadores.

Las cisternas de escurrimiento tienen, generalmente un área de 100 m cuadrados y una altura de 5 a 7 m; su capacidad de almacenamiento oscila entre los 500 y 700 metros cúbicos. Para reducir su costo de construcción es necesario ubicarla en un lugar en donde esté en contacto una capa de roca sólida y una de material suave. Este tipo de cisternas sirve para abastecer de agua a pequeños poblados. Las cisternas pueden construirse bajo el patio de una casa, en los márgenes del lecho de un río o a los pies de las montañas y pueden usarse para abastecer de agua a los habitantes nómadas y sedentarios de las zonas áridas.

Tienen un potencial de desertificación nulo, un costo bajo y requieren una serie de conocimientos tecnológicos simples, reducen las pérdidas por evaporación, además de mantener el agua limpia y libre de impurezas (Anaya, 1977).

5.3.2. ESTANQUE O REPRESA.

En zonas de poca pendiente, con cursos de agua no encajonados, el embalse por dique puede llevar a reservorios de poca profundidad. En estos casos, siempre que las condiciones edáficas lo permitan, y si no puede recurrirse a otro tipo de aguadas, son aconsejables los estanques profundos de paredes inclinadas.

Un estanque, tanque o bordo como se les denomina en el medio rural mexicano, es un recipiente circular que intercepta las aguas de escurrimiento, donde la elevación de todos los puntos de la superficie de su corona, es igual a la elevación natural de la superficie del suelo que intercepta en sus extremos (Figura 9); los estanques son construidos excavando en la superficie donde se va a encontrar el depósito y utilizando la tierra para formar el terraplén o bordo (Velasco, 1991).

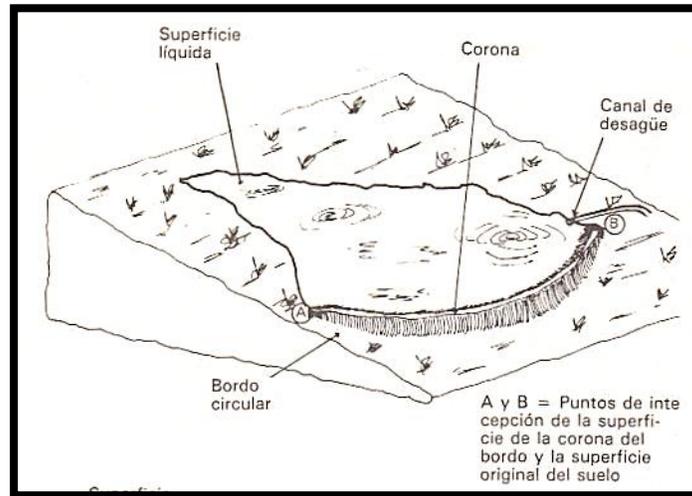


Figura 9. Estanque sobre terreno inclinado (Velasco, 1991).

5.3.3. DOGOUTS

Velasco (1991) define a un Dugouts como una depresión natural del terreno o bien una excavación hecha únicamente sobre terrenos planos, donde las aguas de escurrimiento contribuyen muy poco para que dichos depósitos se llenen; resultando ser las fuentes principales de agua los manantiales o las infiltraciones laterales de las áreas circundantes, éstos carecen de bordos.

5.3.4. CHARCOS

Consiste en dos excavaciones realizadas sobre un terreno inclinado (Figura 10), la primera aguas abajo y la segunda aguas arriba, conectadas por un tubo grueso (25–30 cm de diámetro); en la excavación de aguas arriba se captan los escurrimientos junto con los sedimentos, mientras que en la segunda se almacena el agua con

mucho menor cantidad de sedimentos, en la primera excavación se tienen que realizar desazolves periódicamente (Velasco, 1991).

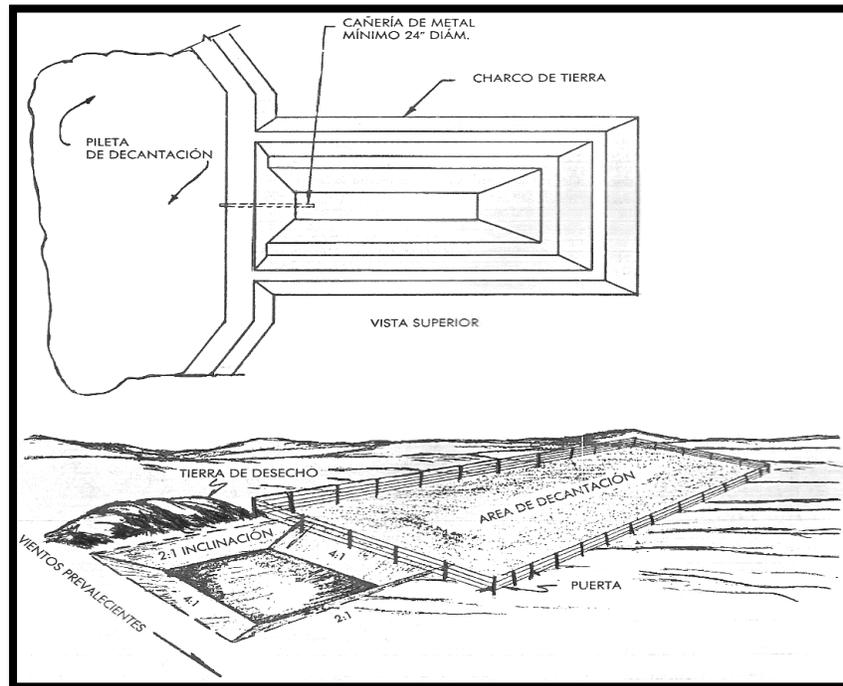


Figura 10. Vista de un charco usado para proveer agua a ganado y animales silvestres.

5.3.5. CAPTACIÓN A NIVEL DE PISO

Para coleccionar agua a nivel de piso (evitando las pérdidas por infiltración), se recomienda nivelar y recubrir el piso con losetas, concreto, asfalto, y hojas de plástico para formar una superficie lisa e impermeable sobre el suelo (Figura 11). Otro método consiste en compactar y mejorar el suelo con aportaciones de arcilla para disminuir su capacidad de infiltración y hacerlo más estable y resistente a la erosión.

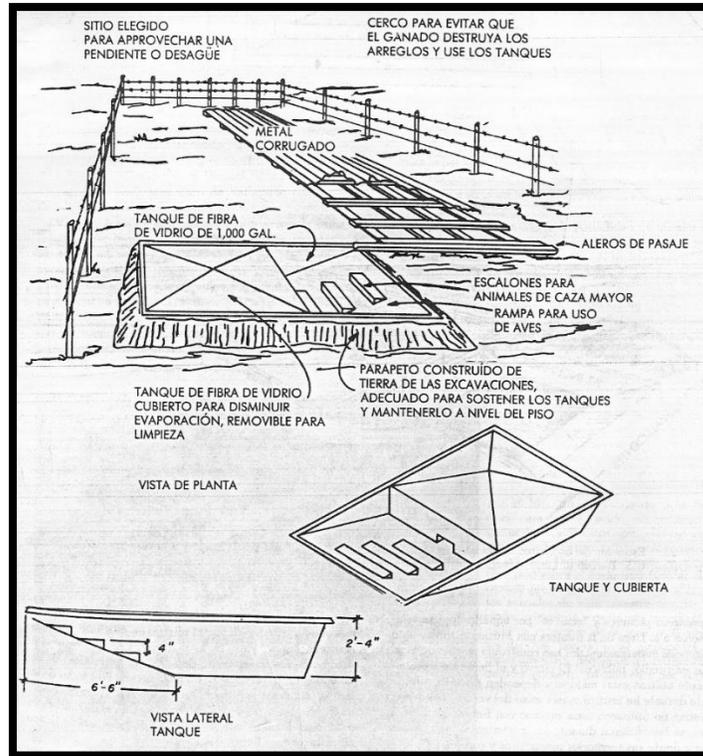


Figura 11. Ejemplo de un sistema de captación a nivel piso.

La cantidad de agua que se puede captar, por unidad de superficie, depende de la intensidad y magnitud de la precipitación, de la impermeabilización del terreno y de la pendiente del mismo entre otros factores de mayor importancia. La proporción del agua que se capta, respecto a la que llueve, varía alrededor del 90% en terrenos con franjas de piso inclinadas y cubiertas con material impermeable. El agua captada es conducida por medio de un canal colector hasta un tanque de almacenamiento.

Existen algunos métodos de recubrimiento superficial que han resultado satisfactorios y son de bajo costo, ejemplo de ellos son:

- a. Asfalto en dos capas, sellador y protección con plástico o fibra de vidrio y cubierto de grava.
- b. Membrana plástica cubierta de grava de diámetro entre 1 y 2 centímetros, adherida al suelo con alquitrán bituminoso. En contraste con su atractivo y bajo costo, este recubrimiento tiene la desventaja de ser muy frágil y de difícil reparación.

- c. Una adecuada impermeabilización se puede obtener con tratamientos químicos aplicados a la capa superficial. Así, por ejemplo, las sales de sodio se pueden mezclar con suelos arcillosos para formar una capa impermeable.

Los suelos tratados pueden proveer de agua a una gran cantidad de personas. No obstante, es necesario contar con una muy buena protección contra la contaminación superficial, y una superficie considerable de terreno. Párrafos abajo se indican algunos sistemas basados en estas técnicas descritos en base a lo expuesto por Velasco (1991).

5.3.5.1. Sistema ITDG (Intermediate Technology Development Group)

Se trata de un área de contribución circular con una cisterna de almacenamiento en la parte central; el área de contribución se nivela con la tierra excavada de la cisterna, de manera que todos los puntos de la circunferencia son más altos que cualquiera de los cuatro lados de la excavación, asimismo la superficie de captación disminuya gradualmente hacia la cisterna, tanto el área de captación como la cisterna son debidamente impermeabilizadas.

Dentro de la cisterna se construyen celdas cilíndricas sobreponiendo anillos de arena-cemento, la cual a cierta altura comienza a cerrarse; estas celdas se interconectan entre sí por medio de orificios conectados por un tubo, al terminar el domo se cubre con una película plástica para llevar a cabo el curado correspondiente. Todas las cavidades se rellenan con arena, quedando sólo una celda abierta para extraer el agua cosechada (Figura 12).

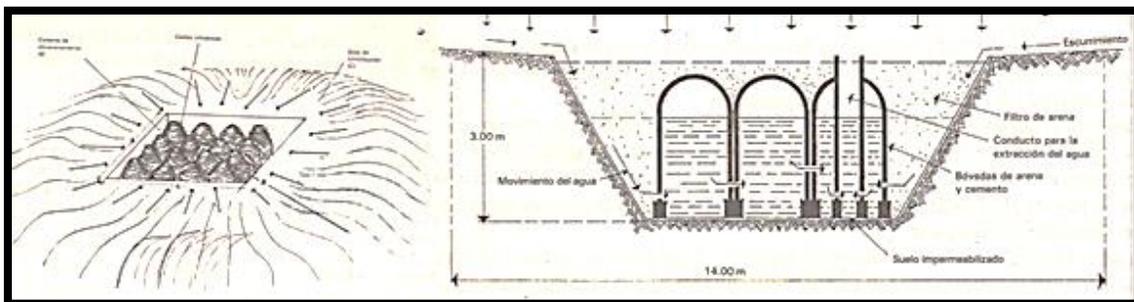


Figura 12. Aspecto de un sistema ITDG (Velasco, 1991)

Para calcular el volumen Velasco establece la siguiente fórmula, donde relaciona las superficies de captación con la precipitación promedio anual y el coeficiente de escurrimiento de la zona:

$$VT = CE[PP(\pi R^2 - LA)] + [PP(LA)]$$

Donde:

- VT: volumen total cosechado durante un año
- CE: coeficiente de escurrimiento del área de escurrimiento
- PP: precipitación pluvial promedio anual
- R: radio de la superficie circular
- L: largo de la cisterna de almacenamiento
- A: ancho de la cisterna de almacenamiento

5.3.5.2. Sistema LT⁴

Este sistema se integra por un área de contribución de forma rectangular o cuadrada impermeabilizada, con una tubería de conducción originada de alguna de las esquinas, generalmente de 6" de diámetro, la cual permite al agua de lluvia recogida en el área de contribución, ser conducida por gravedad a la cisterna de almacenamiento (Figura 13); en el punto medio de la longitud de esa tubería, se instala un desarenador para la eliminación de arenas y limos.

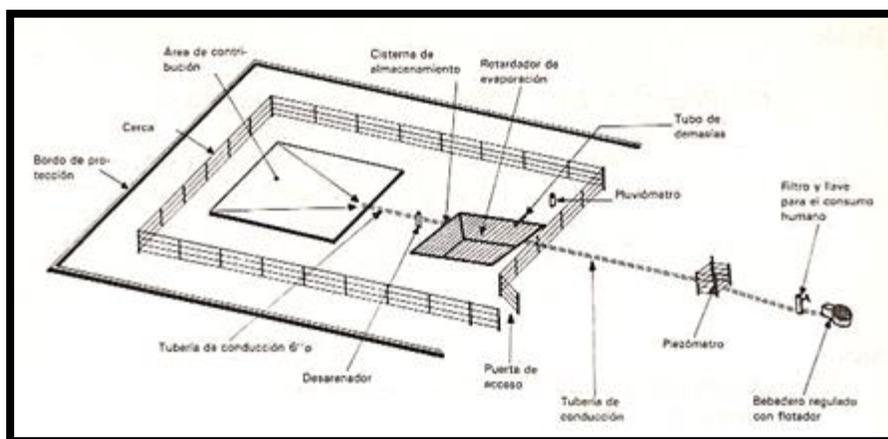


Figura 13. Esquema del sistema LT (Velasco, 1991).

⁴ Diseñado por C. W. Lauritzen y A. A. Thayer.

La cisterna de almacenamiento, al igual que el área de captación, debe estar debidamente impermeabilizada, contar con un retardador para la evaporación y tener un tubo de demasías; en el fondo de la cisterna se origina otra tubería de menor diámetro para la conducción del agua almacenada para su consumo humano o animal, para ello también se instala un filtro con llave y un piezómetro para conocer el nivel del agua.

Para calcular el volumen de cosecha de agua en un año se deben de multiplicar las áreas que fungen como superficie de escurrimiento o de captación por la precipitación promedio anual y los coeficientes de escurrimientos según sea el caso.

En algunos casos, en estos sistemas, como en los de cosecha en techos se utilizan un tipo las llamadas bolsas para almacenar aguas pluviales, las cuales van de uno hasta 400 m³ de almacenamiento (Figura 14).

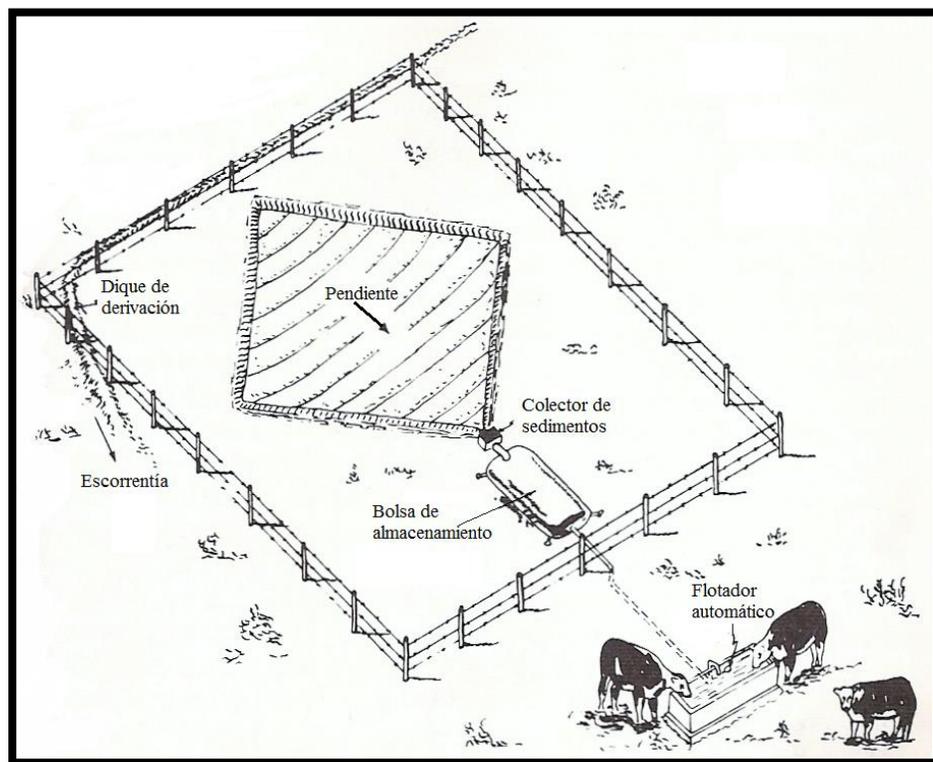


Figura 14. Sistema de Cosecha utilizando una bolsa almacenadora (Lauritzen, 1961)

5.3.5.3. Sistema BC⁵

Este sistema, como el antes mencionado, cuenta con un área de contribución de forma rectangular o cuadrada totalmente impermeabilizada, conectado por uno de sus lados a la cisterna de almacenamiento, la cual también está impermeabilizada y cubierta en su interior por llantas de desecho, además de contener cantos rodados (10 a 20cm de diámetro) a manera de retardador de evaporación. Tanto el área de contribución como la cisterna de almacenamiento quedan protegidas por una cerca de alambre de púas, la zona de escurrimiento se protege con la creación de un bordo distante (Figura 15).

De la misma forma que en sistema LT; en el fondo de la cisterna se inicia una tubería, con objeto de desalojar toda el agua almacenada; a cierta distancia se instala un piezómetro para poder conocer el nivel del agua, la tubería sigue hasta llegar a un filtro con llave para consumo humano y de la misma manera se adapta un bebedero para consumo animal.

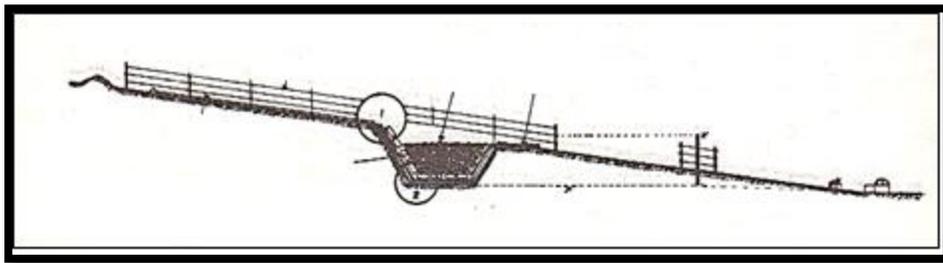


Figura 15. Sistema BC (Velasco, 1991).

Considerando que en este sistema de cosecha de agua de lluvia existe un lado común entre el área de captación y la cisterna de almacenamiento, la formula general para estimar el volumen total cosechado, y que a su vez mediante un despeje se puede obtener las fórmulas para las diferentes partes que lo conforman, se muestra a continuación:

$$VT = CE[PP(BL)] + PP(AB)$$

Donde: VT: volumen total cosechado al año

CE: coeficiente de escurrimiento del área de contribución

⁵ Diseñado por Carwin Brent Cluff

PP: precipitación pluvial promedio anual
 B: ancho del área de contribución (lado común)
 L: largo del área de contribución
 A: ancho de la cisterna de almacenamiento
 B: largo de la cisterna de almacenamiento

5.3.5.4. Sistema Vecar 500,000 L⁶

Para la construcción de este sistema deben tenerse en cuenta; la pendiente, la consistencia del suelo y la accesibilidad a la fuente de agua (Figura 16). Este cosechador trabaja por gravedad, por lo que la pendiente debe oscilar entre 3 y 6%, esto también con el objeto de que la distancia de la cisterna al bebedero sea corta y para evitar arrastres por fuerte pendiente. Para conocer la consistencia del suelo del área a excavar, se penetra una barrena de mano a la profundidad requerida al menos en tres puntos distantes, esto ayudará a decidir el quipo requerido para la excavación; finalmente, la obra debe estar cerca del centro poblacional o en el caso que sea para ganado, debe estar a una distancia no muy lejana de donde pastan.

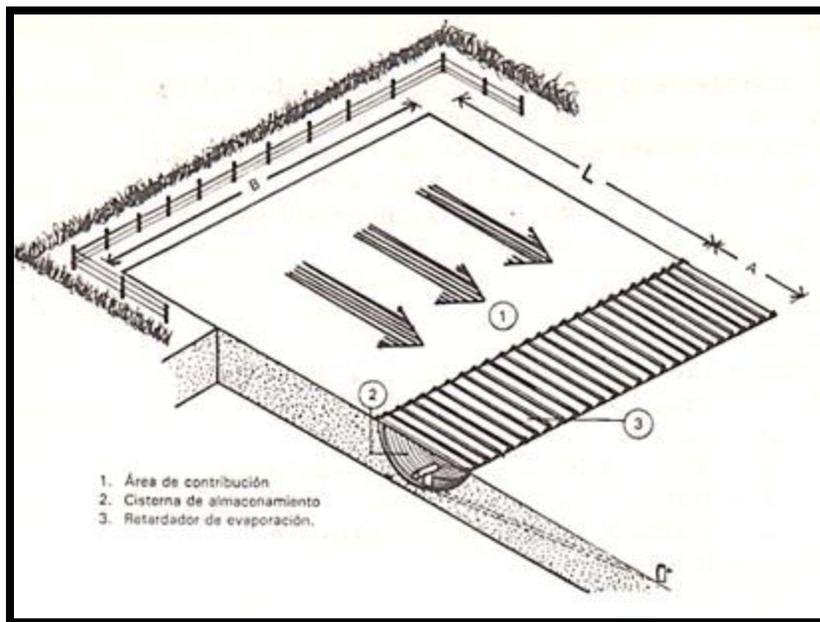


Figura 16. Diagrama del sistema Vecar 500,000 L (Velasco, 1991)

Velasco (1991) describe de la siguiente forma a este sistema:

⁶ Diseñado por H. A. Velasco Molina y G. Carmona R., México.

La superficie en que se desarrolla el diseño de este sistema es de 3,290.8 m² (43.30x76.00 m), la cual está circundada por: una cerca de protección de siete hilos con postes cada 4 metros y una puerta de acceso. En los lados cortos y en el lado largo aguas arriba, se construye un borde de protección, por fuera de la cerca. En el interior de la exclusión se aloja el área de contribución; la cisterna de almacenamiento y de ser posible debe incluirse un pluviómetro, para medir la magnitud de cada evento lluvioso y tomando en cuenta la lectura del piezómetro, determinar la eficiencia del sistema.

El área de contribución conecta directamente con la cisterna de almacenamiento. En el fondo de la cisterna se origina la tubería de conducción, que primeramente pasa por el piezómetro cuyo punto cero se encuentra en la base de la escala de este dispositivo y que debe corresponder topográficamente con el fondo de la cisterna. Después del piezómetro la tubería continúa a una Y donde se bifurca, siendo una de las ramales la alimentación del bebedero para consumo animal y otra, la alimentación del filtro y llave para consumo humano, lo anterior sería efectivo en caso de que el sistema se utilizara para consumo mixto. Sin embargo, podría utilizarse únicamente con bebedero para consumo animal o exclusivamente para consumo humano, para lo cual se instalaría un filtro.

En este sistema el área de contribución y la superficie del retardador de evaporación tienen un lado en común, por lo que la fórmula para calcular el volumen quedaría de la siguiente manera:

$$VT = CE_1 \times PP(BL) + CE_2 \times PP(AB)$$

Donde:

VT: volumen total cosechado al año

CE₁: coeficiente de escurrimiento del área de contribución

CE₂: coeficiente de escurrimiento del área del retardador de evaporación.

PP: precipitación pluvial promedio anual

B: ancho del área de contribución (lado común)

L: largo del área de contribución

A: ancho de la cisterna de almacenamiento

B: largo de la cisterna de almacenamiento

5.3.6. TAJAMAR

Estos sistemas tienen sus principios en el Chaco Paraguayo, donde desde sus inicios los colonos realizan estructuras artificiales de captación y almacenamiento de agua de lluvias a nivel, conocidas como tajamares; los primeros se realizaban a mano o con la ayuda de mulas y carretas, a partir de 1970, se comenzaron a realizar las primeras grandes estructuras, con el uso de maquinarias de campo y viales (Nosetto *et al.*, 2012). Estas obras son similares a otras realizadas en Australia e Israel; se emplean principalmente donde la falta de agua subterránea o la salinidad de la misma son factores limitativos para el desarrollo ganadero.

El sistema consta de un área de captación y conducción de agua de lluvia hacia un tajamar (denominado pulmón), y luego bombearla a un segundo tajamar (denominado reservorio) donde se almacena a varios metros por encima de la superficie circundante (Figura 17) (Nosetto *et al.*, 2012), no obstante existen varios diseños dependiendo de los fines de aprovechamiento.

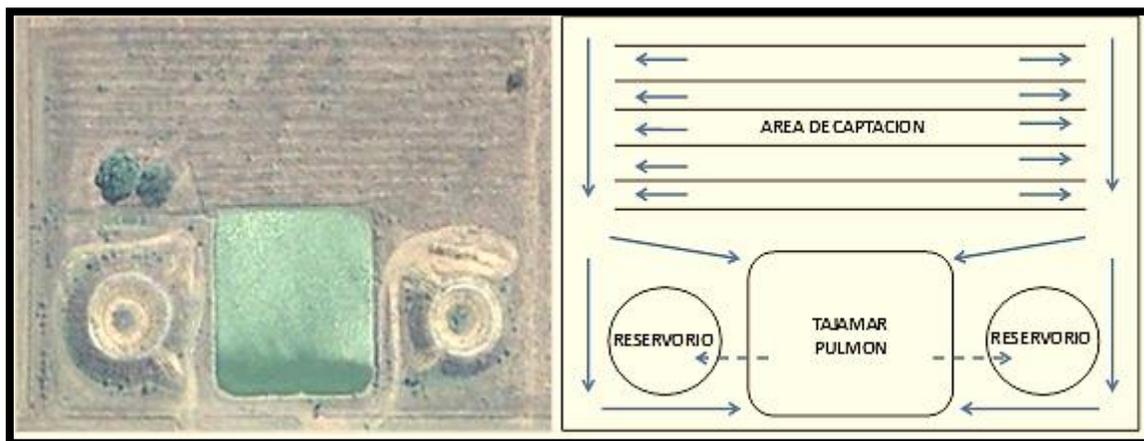


Figura 17. Esquema de un sistema con Tajamar (Nosetto *et al.*, 2012).

La factibilidad de la construcción de un tajamar está dada por el relieve del terreno, a manera de poder contar con una buena captación del agua de lluvia, y el régimen pluviométrico, dado que las precipitaciones de pocos milímetros no aportan agua al tajamar, pues no producen escorrentía. Comúnmente se construyen en suelos arcillosos con por lo menos 3 m de profundidad (OAS-UNEP-IETC, 1997).

La capacidad del tajamar está relacionada con la cantidad de animales a los que deberá proveer de agua. Para calcular la capacidad necesaria del tajamar se consideran 80 L/día/animal. Esta cifra se multiplica por los días de sequía corrientes en la zona, más un margen de seguridad por secas prolongadas, por lo que se debe extender, según la zona, a 180-300 días.

La evaporación del espejo de agua es de importancia, pudiendo alcanzar valores de 7L/día/m² de superficie. Esta cifra se considera como promedio, oscilando de acuerdo a las variaciones que experimentan los factores climáticos.

También hay que considerar la infiltración del agua, que fundamentalmente, depende del tipo de suelo y de la forma de construcción del tajamar. Las pérdidas por evaporación e infiltración en conjunto promedian hasta el 50% de la reserva de agua; por lo tanto, al tomar un valor de almacenaje de 80 L/día/animal, estamos reservando alrededor de 30-50 L netos/día/animal.

Siendo así, el cálculo exacto de la capacidad de un tajamar se debería efectuar de la siguiente manera: consumo diario por animal (unos 50 l) por el número de cabezas a abastecer por los días de seca normales, más un margen de seguridad, más los índices de evaporación y de infiltración del lugar.

En cuanto a la ubicación, ésta debe ser preferentemente en lugares con poca pendiente, donde el agua corra mansamente, sin producir grandes torrentes. Los suelos más indicados son los de tipo arcilloso, ya que en los arenosos se produce gran cantidad de infiltración. Para determinar la dirección, hay que conocer la dirección de los vientos predominantes en la región y construirlo de modo que su menor ancho sea perpendicular a la misma.

Construcción:

i. Tajamar

Para la construcción de un tajamar, primeramente se debe efectuar la limpieza de la totalidad de la vegetación existente, luego se procede a la excavación construyéndose lo terraplenes con la tierra extraída, la excavación debe hacerse preferentemente por mitades, es decir, terminar una parte y luego iniciar la otra, de

tal manera que cuando se produzca una precipitación inesperada, que paralizaría el trabajo de excavación, se pueden comenzar los trabajos en la otra mitad.

Hay medidas clásicas de un tajamar que son aproximadamente a nivel de superficie 90 m de largo por 50 m de ancho y en la base 75 m de largo por 40m de ancho. La longitud puede variar, pero el ancho no debe sobrepasar los 50m por razones de trabajo mecánico y de oleaje por el viento. El ancho y la profundidad de la excavación dependen de la capacidad de la maquinaria a utilizar y de la proximidad de la capa impermeable.

La descarga de la tierra se efectúa a 10-12 m del borde de la excavación, depositándose preferentemente en capas de no más de 30 cm de espesor, para facilitar su apisonado. La pared del tajamar y su construcción reviste una gran importancia, ya que según como se realice, se pueden o no producir desmoronamientos; la base del terraplén debe tener 6 metros de ancho como mínimo, y si es necesario, debe cubrir todo el perímetro del tajamar. El ancho de la cresta no debe ser menor a 12m.

Los taludes o escarpadas deben tener una pendiente de 3:1 hacia adentro y de 2:1 hacia afuera. Si durante la compactación no se tiene un grado suficiente de humedad, es conveniente ampliar estas proporciones, es decir, darle una caída más suave. La relación del terraplén con respecto a la profundidad bajo el nivel cero, debe ser de 2:1.

Para proteger el terraplén contra el arrastre de las lluvias y vientos, es necesaria la implantación de vegetación, además debe ser cercado perimetralmente con alambrado para impedir el acceso, evitando con ello el desmoronamiento y contaminación del agua.

ii. Área de captación

El área de captación es una superficie del terreno destinada específicamente para la cosecha de agua de lluvia donde se elimina la vegetación, se encamellona al suelo y se generan canales que conducen el agua hacia un punto determinado, denominado tajamar pulmón (Nosetto *et al.*, 2012). En esta área no debe haber ningún cultivo; sino que en esta zona se deben hacer canaletas de alimentación,

orientadas en el sentido de la dirección de la pendiente y que afluyan hacia la cabecera del tajamar, abriéndose en forma de V hacia las nacientes; el ancho de las canaletas depende de la maquinaria que se utilice, pudiendo llegar hasta unos 2 m, con una profundidad de 20-25 centímetros. La tierra que se extrae de su construcción se descarga en montículos, evitando la formación de un cordón a lo largo de ellas, lo que impediría su función. El largo depende de la capacidad del tajamar y de la superficie colectora, pero nunca será menor de 200 metros.

Para calcular el área de captación adecuadamente, se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{Superficie de captación}(ha) = \frac{m^3 \text{ del tajamar}}{\text{régimen pluviométrico anual mínimo (mm)}}$$

En ciertos casos, es necesario y posible contemplar las regueras con camellones para detener el agua y hacerla correr hacia la pileta de decantación.

Se construye también una pileta de decantación, la cual se ubica dentro del sector alambrado de cierre del tajamar y que trabaja como un decantador, evitando la entrada de tierra y otras materias que son arrastradas por el agua que llega por las canaletas de alimentación y que reducirían la vida útil del tajamar (colmatación). Es el único lugar por donde debe pasar toda el agua que llega al tajamar. Su construcción se debe hacer con hormigón; a una profundidad de 60 a 80 cm, el largo de 5 a 6 m y el ancho de unos 4 m, su comunicación con el tajamar debe ser también de cemento, a un nivel lo más alto posible. En este lugar es conveniente colocar una compuerta, para que una vez lleno el tajamar, se impida que siga entrando agua, dado que esto llevaría más rápidamente a la colmatación.

Es necesario construirles vertederos, con piso y paredes de cemento o piedras, de manera que si el agua embalsada aumenta su nivel en demasía, no desborde por sobre el terraplén, provocando su derrumbe.

Debe evitarse la presencia de vegetación acuática dentro del tajamar. Si bien las plantas evitan en parte la radiación solar directa sobre el agua, la pérdida por transpiración de las hojas alcanza valores cinco veces mayores que el de las pérdidas por evaporación directa. Además, es imprescindible hacer por lo menos

una limpieza anual. Se debe controlar periódicamente el grado de colmatación del tajamar.

iii. Reservorios

En cuanto a los reservorios, de acuerdo con Nosetto *et al.* (2012) existen dos tipos, el tanque australiano y los reservorios elevados, lo cuales describen de la siguiente forma:

- El tanque australiano es una estructura con forma de volcán de entre 10 a 12 m de alto y entre 30 y 50 m de diámetro, donde el agua es almacenada durante un tiempo relativamente corto para ser distribuido a su uso (máximo 6 meses) más largo; tiene una base de tierra que ayuda a impermeabilizarlo y a la vez permitir el transporte de agua por gravedad, este tipo de tanque es usado generalmente en la ganadería por el volumen relativamente pequeño de agua que usan (Figura 18).
- Los reservorios elevados son de diferentes formas geométricas, se excava tierra dentro de ellos con la cual se construye el terraplén del mismo, con el fin de generar mayor profundidad de almacenamiento de agua; posee una relación superficie/profundidad mucho menor que la del pulmón, o tajamar, para evitar las pérdidas por evaporación, y al estar en altura genera un gradiente hidráulico adecuado para su posterior uso (aunque parte del mismo requiere de un sistema de bombeo), además, al mover menos tierra, en relación al almacenamiento, es una forma mucho más económica que el tanque australiano y se emplea generalmente en industrias y en proyectos de riego (Figura 19).

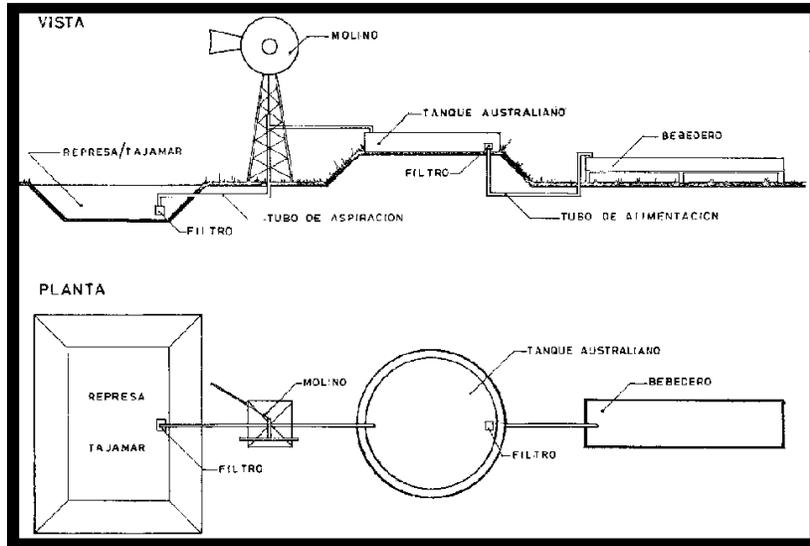


Figura 18. Tajamar con tanque australiano (OAS-UNEP-IETC, 1997).



Figura 19. Tajamar con reservorios elevados (Nosetto et al., 2012).

Finalmente, la extracción por lo común se hace con un molino bombeador o sifón, que vuelcan el agua a un tanque australiano elevado, mezclándose si es necesario con aguas salobres, y de allí se distribuye. Cabe destacar que los principales problemas de almacenar el agua son la contaminación biológica, la concentración de sales y el crecimiento de algas.

Nosetto *et al.* (2012) indican que el agua recolectada en los tajamares es utilizada por tres grandes actores: la ganadería, la industria y la agricultura, siendo la primera

la más antigua y menos demandante. Estos autores sostienen que para mantener a un rodeo de 100 animales hace falta 1.5 ha de área de captación; por otra parte indican que la industria, de acuerdo a experiencias con pobladores, es el segundo destino del agua. Cabe mencionar que Nosetto *et al.* (2012) expresan que en los últimos años, en la zona del Chaco Paraguayo se comenzó con los primeros ensayos de riego por goteo y por aspersión.

5.3.7. OLLAS DE AGUA (JAGÜEYES)

Las ollas de agua también son conocidas como jagüeyes, cajas de agua, aljibes, trampas de agua o bordos de agua; son depresiones sobre el terreno, que permiten almacenar agua proveniente de escurrimientos superficiales, en este sentido, Jagüey es un vocablo taíno que significa balsa, zanja o pozo lleno de agua, en el que abreva el ganado (Figura 20) (Domínguez, 2009).

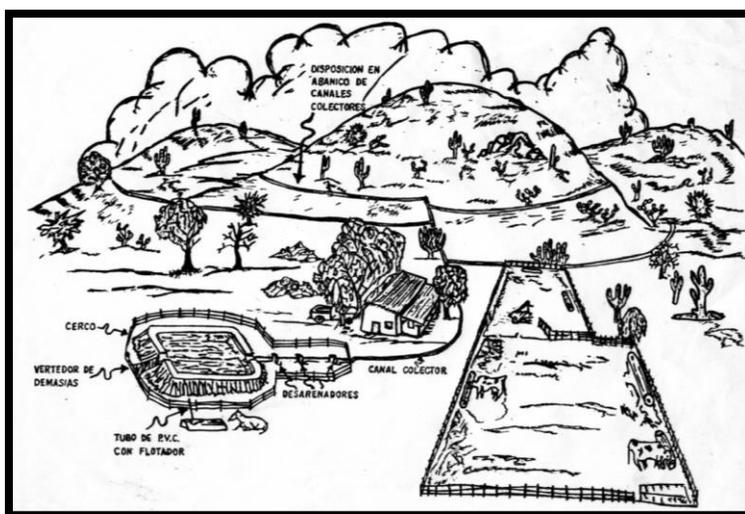


Figura 20. Vista de un Jagüey (Jaquez, 1982)

El objetivo de estas obras es coleccionar el agua de los escurrimientos producidos por la lluvia, para utilizarlos en la producción ganadera (aunque, en algunos casos, el agua coleccionada y almacenada es de excelente calidad y puede usarse para consumo doméstico). Es importante resaltar que existen jagüeyes naturales, sin embargo en esta monografía se hablará únicamente de los artificiales.

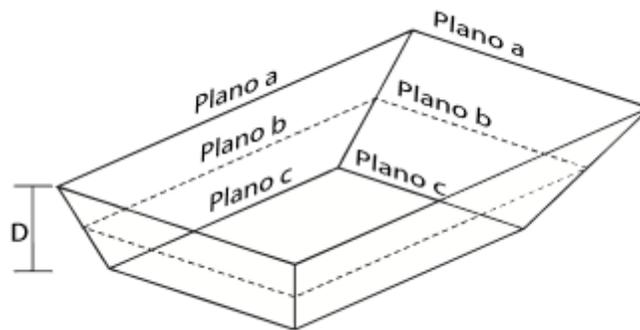
No existe un rango de tamaño de jagüeyes bien definido, no obstante en Reino Unido han adoptado extensiones para estos sistemas de entre varios m² hasta 2 ha,

siempre y cuando se retenga agua por lo menos por cuatro meses al año (Domínguez, 2009).

Los jagüeyes deben diseñarse sobre suelos con textura franca o arcillosa, para asegurar un grado de impermeabilidad adecuado, se pueden construir en el paso de una corriente intermitente, asimismo es posible acondicionar un terreno con un bordo en forma de media luna o rectangular para captar agua en una superficie de ladera con pendiente ligera, para su construcción regularmente se utiliza maquinaria pesada, esto para realizar con mayor rapidez y facilidad los movimientos de tierra, aunque también puede emplearse maquinaria más ligera como las retroexcavadoras tipo mano de chango (Domínguez, 2009).

Domínguez (2009) menciona que para el diseño de los jagüeyes se debe tener en cuenta la precipitación pluvial media anual y su distribución en el tiempo, además de la demanda de agua y el coeficiente de escurrimiento; a partir de estos datos se determina el volumen de agua a cosechar y consecuentemente las dimensiones de las ollas de agua, a partir de modelos con figuras regulares para reservorios con formar irregulares: un ejemplo de ello es el propuesto por USDA (Agriculture Handbook 590), donde se emplea la siguiente fórmula:

$$V = \frac{A \times 4B \times C}{6} \times \frac{D}{27}$$



- Donde:
- V: volumen de excavación
 - A: área del plano (a) en m²
 - B: área del plano (b) en m²
 - C: área del plano (c) en m²
 - D: profundidad máxima en m.

Por último, la superficie del jagüey debe ser compactada para reducir las pérdidas por infiltración, ya sea con maquinaria o con alguna otra técnica.

5.3.8. PRESAS DE BANCO EXTENDIDO

En los distritos costeros del sur en el Oeste de Australia los suelos son, principalmente, de textura arenosa sobre subsuelos arcillosos (las arenas pueden tener una profundidad mayor a 0.7 m) y las lluvias son de baja intensidad, por lo que los sistemas convencionales de captación no son efectivos. En estos casos, los caminos de captación deben ser muy anchos (más de 15m) con una capa continua de arcilla sobre ellos; esto resulta muy costoso y puede causar graves problemas de erosión. En estos lugares los terrenos son planos (pendientes menores al 2%), y una buena presa de paredes y piso de arcilla puede construirse a una profundidad de 1.5 m. Éstas condiciones particulares han generado el desarrollo de una combinación de tanque excavado y un área de captación adyacente que sea recubierta con arcilla. Estos sistemas han dado resultados similares a los obtenidos por los caminos de captación cuando se utiliza el mismo tipo de arcilla (Laing, 1981).

5.3.1. PRESAS PEQUEÑAS DE TIERRAS

Se refiere a obras de pequeña magnitud para satisfacer necesidades de núcleos pequeños de población, están diseñadas para recolectar aguas de escurrimiento de cuencas de poca superficie, cuya construcción sólo requiere de movimientos de tierra o cuando mucho de piedra y grava: estos recipientes no son obras civiles, sino almacenamientos de reducida capacidad contruidos para necesidades de núcleos pequeños (Velasco, 1991).

Una presa de tierra pequeña es un almacenamiento de reducida capacidad abastecido únicamente por agua de escurrimiento, cuya estructura principal es un bordo que no excede a los 5 ó 7 m de altura, el cual está básicamente construido de tierra compactada y generalmente une dos puntos elevados del área (Velasco, 1991).

Cuando se planea diseñar una presa de este tipo, se deben satisfacer dos requisitos fundamentales: 1) debe ser estructuralmente estable y, 2) debe tener el máximo de impermeabilidad. Ambos requisitos deben cumplirse tácitamente para obtener óptimos resultados. Para ello existen varias alternativas para satisfacer el requisito de impermeabilidad, todo depende del material disponible en el sitio de trabajo, resultando por ello diferentes tipos de bordos, descritos a continuación en base a la obra de Velasco (1991):

i. Bordos homogéneos

Este tipo de bordo se ancla al terreno por medio de una zanja excavada longitudinalmente en la franja del terreno donde va a edificarse la cortina, de tal manera que la zanja se rellena del mismo material que se construye el bordo; preferentemente de materiales altamente impermeables, como el limo y la arcilla (Figura 21).

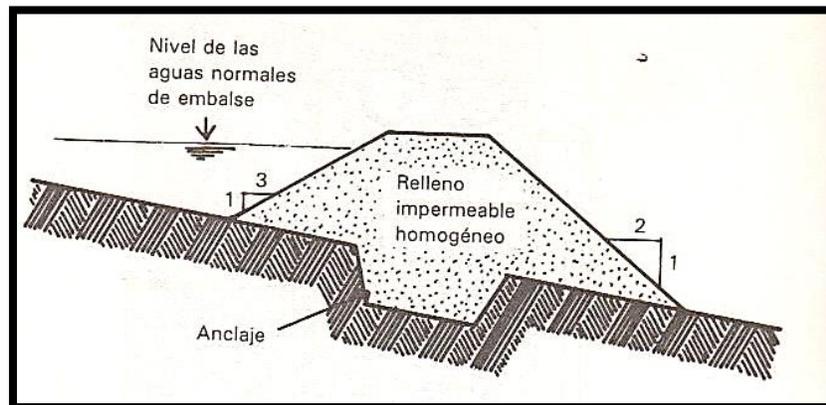


Figura 21. Bordo homogéneo (Velasco, 1991).

ii. Bordos de núcleo impermeable

Se implementan en caso de no haber suficiente material impermeable. Siendo que la mayor parte del material será permeable, por lo que deberá construirse dentro de este una barrera en la forma de núcleo impermeable anclado al terreno por medio de una zanja longitudinal; la tercera parte del ancho de la base del bordo corresponde al ancho del núcleo y los taludes de éste deben guardar una proporción de 1:1, o más pronunciados (Figura 22).

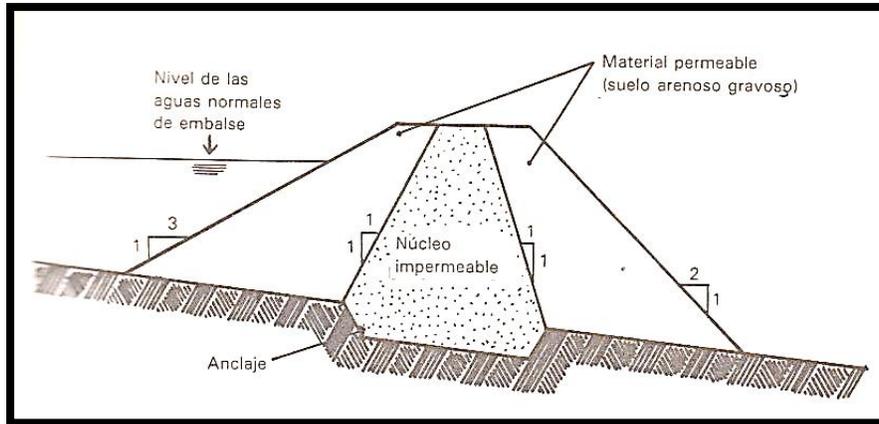


Figura 22. Bordo de núcleo impermeable (Velasco, 1991).

iii. Bordo delantal

Este tipo de borde se construye cuando sólo se cuenta con materiales moderadamente permeables. En estos bordos una franja ancha del fondo del recipiente, contigua al talud aguas arriba y el mismo talud aguas arriba, reciben la aplicación de una capa de material fino impermeable (Figura 23).

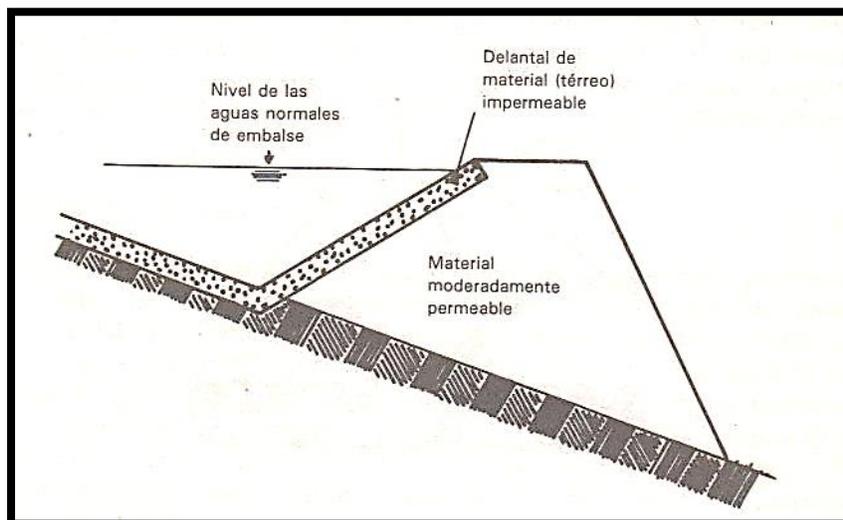


Figura 23. Bordo delantal (Velasco, 1991).

iv. Bordo con diafragma

Al no existir material arcilloso a la mano, se procede a construir bordos con diafragma. El diafragma es una barrera de concreto construida longitudinalmente en la parte central del borde, que penetra lo suficiente en la superficie del suelo para lograr una buena cimentación (Figura 24).

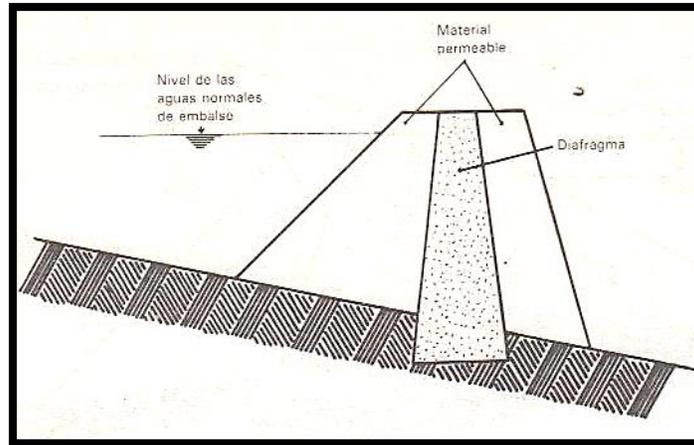


Figura 24. Bordo con diafragma (Velasco, 1991).

v. Bordos construidos sobre materiales permeables de mediana y gran profundidad

Si el terreno donde va a construirse un bordo tiene un suelo permeable, con roca o un estrato impermeable, a una profundidad razonable, la zanja para la implantación del anclaje deberá ser excavada hasta esa profundidad y rellena con el mismo material impermeable con que fue construido el núcleo; de esta manera, tanto el núcleo como la zanja profunda de anclaje formarán un solo cuerpo impermeable.

La base de la zanja de anclaje deberá tener por lo menos un ancho de 1.2 m y sus taludes deben ser 1:1, de la misma forma que el núcleo (Figura 25). Si el sustrato impermeable es muy profundo, debe construirse una prolongación lateral del núcleo hacia el talud aguas arriba (Figura 26).

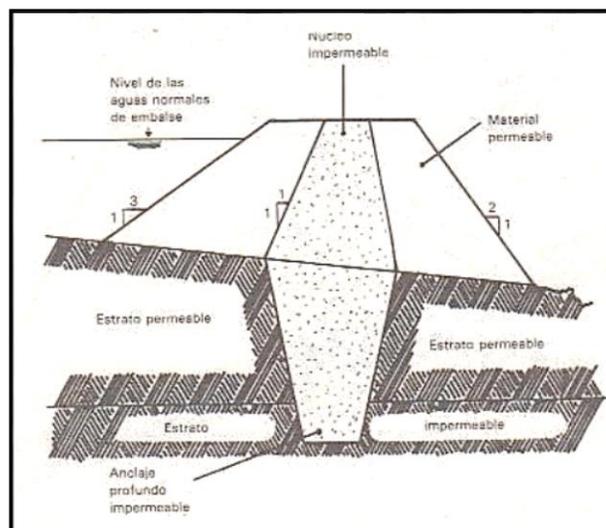


Figura 25. Bordo con núcleo y zanja (Velasco, 1991).

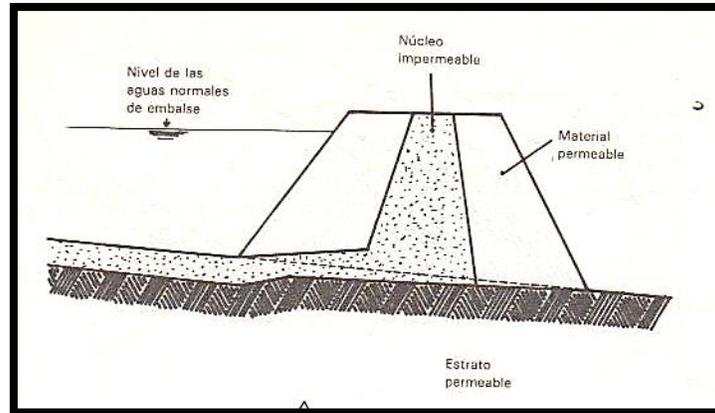


Figura 26. Bordo con núcleo y prolongación (Velasco, 1991).

Cuando se construyan los bordos con materiales permeables o semipermeables, es necesario instalar un dren en la parte inferior del talud aguas abajo del bordo, preferentemente con canto rodado o con rocas, grava y arena.

La presa debe estar localizada de tal manera que el agua almacenada tenga una profundidad de 2.5 a 3 m, en un 15 a 25 % del área que ocupa la superficie líquida,, los sitios que cumplen con lo anterior se localizan en zonas aguas arriba colindantes a un paso estrecho entre dos elevaciones someras. Además de lo anterior debe considerarse en base a los materiales disponibles de la zona, el diseño más adecuado del bordo, la instalación de vertederos de demasía y la adecuación para el uso del agua.

5.3.2. COLECTORES DE AGUA DE LLUVIA RECUBIERTOS CON ARENA

En este método los escurrimientos de agua de lluvia se dirigen hacia una capa de arena que cubre los tanques de almacenamiento. La arena evita las posibles pérdidas por evaporación y filtra el agua que pasa por ella, mejorando su calidad.

Con este método es posible abastecer de agua a pequeños poblados, casas y granjas. El principio en que se basa es, en esencia, el mismo en el que de manera natural el agua se potabiliza; no requiere de sustancias químicas. Su potencial de desertificación es bajo, tiene un costo intermedio y requiere de una tecnología intermedia).

5.4. Cosecha de inundación

5.4.1. EMBALSES POR DIQUE (PRESAS)

Se denomina dique o presa a un muro de contención que se efectúa en un curso permanente o transitorio de agua, generalmente donde dicho curso corre encajonado. El espejo de agua resultante de la detención de las aguas recibe el nombre de embalse.

Un dique bien proyectado de acuerdo a la cuenca de captación, embalsará la máxima cantidad de agua, de manera que después de una lluvia y consiguiente corriente, el escurrimiento aguas abajo del dique será considerablemente menor que antes de su construcción.

El terraplén deberá tener un talud de 3:1 (3 m horizontales por cada metro de altura) aguas arriba y de 2:1 aguas abajo. Para su construcción pueden utilizarse piedras asentadas en barro o cemento, ladrillos o cemento armado. En los casos en que se emplee simplemente tierra, deberá colocarse sobre la pared que contacta con el embalse, un manto de piedras para proteger al dique en casos de creciente.

La altura del dique está determinada por el caudal de agua que se desea almacenar. Debajo de la base del dique y en toda su longitud, se construye un muro de 60 cm de profundidad, con el objeto de impedir filtraciones de agua. Se debe hacer un vertedero cuyas dimensiones variarán según la magnitud de las crecientes máximas del río o arroyo y en ocasiones es necesario instalar una compuerta para desahogar total o parcialmente el embalse.

No deberán plantarse ni permitir que desarrollen en las orillas árboles de raíces profundas, las que actuarían como vías de infiltración.

5.4.2. PRESAS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las presas subterráneas se han venido implementando desde épocas antiguas; en la época romana se construyeron este tipo de presas en Cerdeña, asimismo las

civilizaciones antiguas del Norte de África practicaron este método (Hanson y Nilsson, 1986). En épocas recientes se ha reportado el uso de estas presas en el sur y el este de África, en la India (Hanson y Nilsson, 1986), asimismo se han hecho estudios sobre las presas subterráneas construidas durante los años noventa en Brasil y Kenia (Foster y Tuinhof, 2004).

De acuerdo a Hanson y Nilsson (1986), existen dos tipos de presas de agua subterránea: a) presas subterráneas, que se construyen debajo del nivel del suelo y detienen el flujo de los acuíferos, y b) presas de almacenamiento de arena, la cual retiene agua en los sedimentos acumulados por la misma presa (Figura 27). Muchas veces estos tipos de presas se combinan, debido a que el nivel de la primera puede causar deposición de sedimentos y la construcción de la segunda implica excavar hasta llegar a la roca madre o la capa impermeable más próxima.

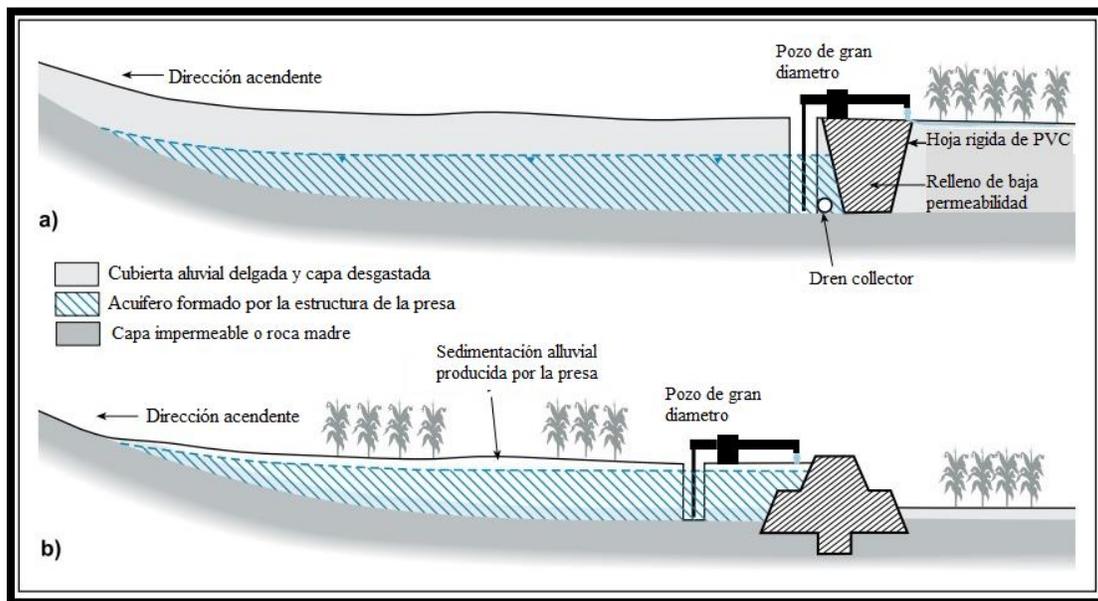


Figura 27. Secciones longitudinales de las estructuras de (a) presa subterránea y (b) presa de almacenamiento de arena (Foster y Tuinhof, 2004)

La topografía es un factor determinante para el éxito de esta tecnología, pues es recomendable implementar estas obras en los valles bien definidos o estrechos y cursos fluviales, o bien en las zonas de transición entre las montañas y llanuras; con pendientes poco inclinadas, de 1-5% hasta 15 %, donde el entorno geológico contiene considerablemente arena y grava; todo esto con un previo conocimiento de la fluctuación del nivel del agua (Hanson y Nilsson, 1986). A continuación se

detallan la construcción y naturaleza de los dos tipos de presas de aguas subterráneas arriba señaladas.

5.4.2.1. Presas subterráneas.

Para su construcción se excava una zanja a través del valle hasta llegar a la roca madre o a alguna capa impermeable, se construye una pared impermeable en la zanja y al terminar la presa se rellena la zanja con el material excavado. Las profundidades excavadas para la zanja generalmente no van más allá de los 6 metros, por otro lado, el material relleno debe ser compactado mecánicamente (Hanson y Nilsson, 1986).

Para construir el dique se pueden utilizar diversos materiales, entre los cuales están: arcilla compactada, siendo una alternativa conveniente en suelos permeables y para niveles freáticos de poca profundidad siempre y cuando sea bien compactada; concreto, cuidando que las cantidades de cemento, grava y arena deben sean las correctas y; mampostería, la cual requiere de grandes cantidades de piedra y cemento (Mundo, Martínez, Hernández, Delgado y García, 1997). También se puede utilizar ladrillo revestido y materiales impermeabilizantes como alquitrán, polietileno y hojas plásticas (Figura 28).

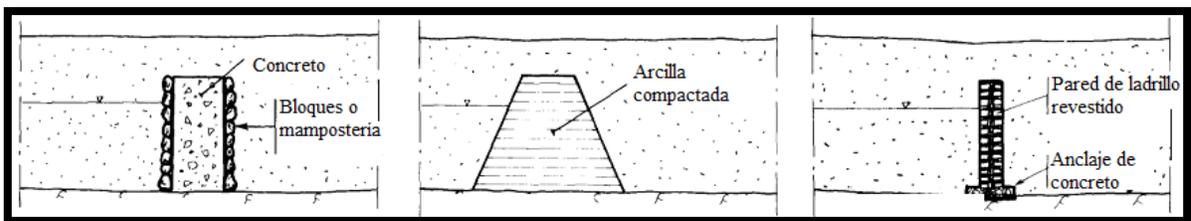


Figura 28. Presas subterráneas elaboradas con diferentes materiales.

5.4.2.2. Presa de almacenamiento de arena.

Se construye en cauces superficiales, con el fin de que los sedimentos arrastrados por la corriente cubran la presa hasta llegar a su nivel, evitando con ello la evaporación del agua. Según Hanson y Nilsson (1986), para la construcción de este tipo de presa debe conocerse la velocidad del caudal en el embalse y la sedimentación natural de la corriente (basada en experiencias anteriores), esto para definir la altura de la presa y evitar que el nivel sea rebasado; así mismo para evitar este problema en muchos lugares se deja una muesca en el dique para que la acumulación de sedimentos sea sólo hasta cierta altura. Por otra parte, estas presas pueden ser construidas con mampostería, piedras, gaviones, hormigón y concreto, entre otros (Figura 29).

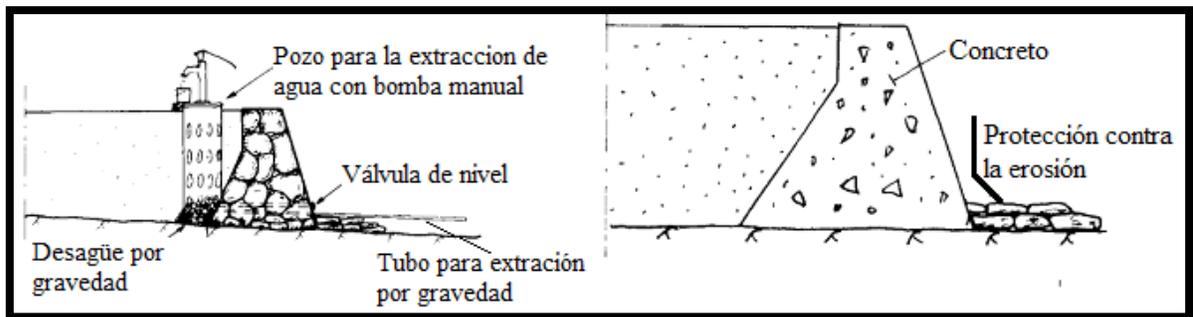


Figura 29. Estructuras de una presa de almacenamiento de arena.

El mantenimiento de una presa de agua subterránea radica en el cuidado de la bomba y de las tuberías de extracción. Se recomienda limpiar el área arriba de la superficie de la tierra y no construir edificaciones sobre la misma (Mundo *et al.*, 1997).

Generalmente las presas superficiales, utilizadas para retener el escurrimiento, presentan pérdidas muy altas por evaporación, por lo que las presas subterráneas son una alternativa ante estos problemas (Foster y Tuinof, 2004).

5.4.3. ACEQUIAS

La forma más típica con que los españoles se abastecían de agua, tanto en América como en Europa, fueron las acequias o diques de riego. El sistema individual de acequias consiste en una serie de trabajos para derivar el agua y un canal que la

conduce a los campos agrícolas y que, en ocasiones devuelve el agua no utilizada al río (Figura 30). Con la elevación parcial del cauce del río que pasa por el valle, la acequia puede conducir el agua a lugares más lejanos y, por consiguiente, aumentar la cantidad de tierras que se encuentran entre el río y su cauce. Como esta superficie tiene un nivel más bajo que el que tiene la acequia, el agua para riego puede correr por canales que nacen de los diques laterales del río. El exceso de agua retorna directamente desde los campos agrícolas o por medio de una extensión de la acequia que se abre específicamente con este propósito. El avance frontal de la corriente se controla mediante una pendiente muy suave del canal.

Las acequias no solo proporcionan agua para riego y uso doméstico, sino que también son una fuente de energía para ciertas máquinas mecánicas simples. La acequia de la Misión de San José, en San Antonio (Texas), servía como energía adicional para hacer funcionar un molino de granos, construido en los últimos años del siglo XVIII. El agua de la acequia que pasaba a través de un tanque equalizador, movía una especie de turbina horizontal de disco, la cual estaba conectada a un conducto vertical que hacía funcionar las piedras del molino colocadas sobre el piso. Este molino, uno de los muchos ejemplos de los molinos “escandinavos” en los Estados Unidos, fue descubierto durante las excavaciones en la misión de San José en 1934 y posteriormente fue reconstruido de acuerdo al diseño original (Baker, 1974).

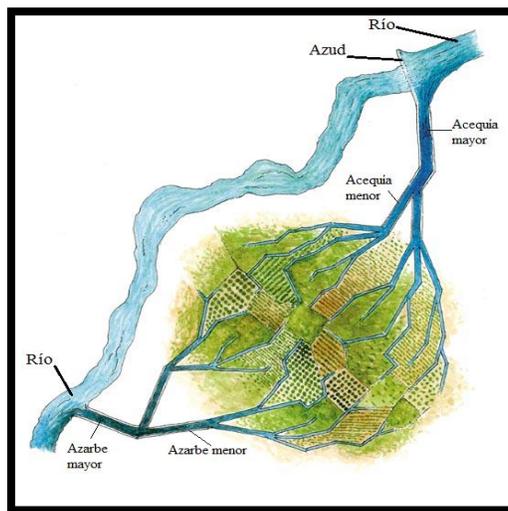


Figura 30. Esquema de un sistema de riego mediante acequias (Vera, 2005)

En las zonas áridas la época de lluvia es, generalmente, corta pero con lluvias intensas. La capacidad de infiltración del suelo no es suficiente para almacenar toda el agua que cae en este lapso, lo que ocasiona la formación de torrentes que recorren muchos kilómetros hasta desembocar en el mar o en algún lago. El efecto devastador de estos torrentes puede ser muy grande. Mediante la utilización de las acequias se puede reducir el volumen y la velocidad del agua que circula en ellos, almacenarla y/o utilizarla directamente.

Cuando se utilizaba para riego, las acequias necesitaban de un plan especial de ingeniería para controlar la lámina de riego. Los sitios potenciales, para ubicar estos sistemas, comienzan al pie de las cadenas montañosas de muchas zonas áridas y semiáridas.

Los factores que se deben considerar son la topografía, el tipo del suelo y la vegetación. Se deben de buscar condiciones especiales como:

- Que los escurrimientos produzcan una cierta cantidad de agua cada año;
- Que existan terrenos planos o con pendientes pequeñas y con suelos apropiados para la agricultura.

Uno de los problemas que presenta este método son los sedimentos y gravas que acarrearán las corrientes de agua. Ellos pueden obstruir los canales y afectar negativamente a las zonas de cultivo (National Academy of Sciences, 2001).

5.5. Aprovechamiento de aguas subterráneas permanentes

La implementación de embalses superficiales conlleva diversas desventajas, como riesgos de contaminación del agua, sedimentación y pérdidas por evaporación, por lo que el aprovechamiento de aguas subterráneas ha sido una forma de evitar estos problemas, sin embargo, en países en vías de desarrollo el aprovechamiento del agua subterránea conlleva problemas graves de operación y mantenimiento tanto de la maquinaria como de las obras (Hanson y Nilsson, 1986). Asimismo, la sobreexplotación de los mantos acuíferos ha sido un problema de alta magnitud en varios países.

5.5.1. LOS QANATS

Los qanats son métodos de derivación de agua subterránea sin la utilización de sistemas de bombeo. La National Academy of Sciences (2001) menciona que un qanat está compuesto, básicamente por tres partes (Figura 31):

- Uno o más pozos auxiliares verticales, excavados en dirección hacia donde se localiza el manto de agua que un terreno aluvial haya sido capaz de retener;
- Un túnel horizontal con una pendiente muy suave que conduce el agua obtenida en los pozos verticales hacia algunos sitios localizados sobre la superficie del terreno, que se encuentran en un nivel más bajo (además, este túnel actúa como una superficie que filtra el agua colectada);
- Una serie de ventilas verticales que conectan el túnel horizontal con la superficie; su función es dar ventilación y ser una vía para sacar los materiales producto de la excavación.

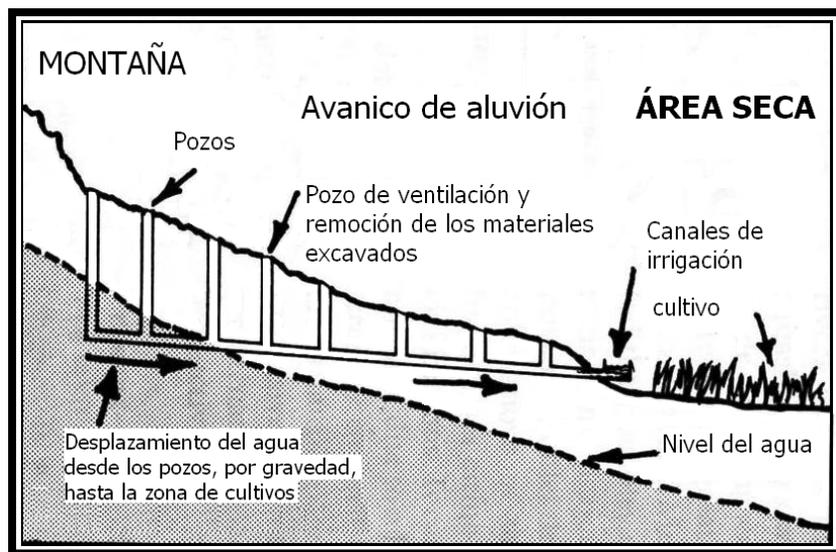


Figura 31. Esquema de sección longitudinal de un qanat (National Academy of Sciences, 2001)

Las bases físicas de los qanats descansan en que las cadenas montañosas reciben una considerable y constante cantidad de agua de lluvia, que sirve para recargar el manto freático, mientras que las zonas planas adyacentes, propicias para la agricultura tienen una reducida y mal distribuida precipitación (Anaya, 1977).

El término qanat es de origen semita y es el ancestro de la palabra “canal”; estos sistemas se conocen con los nombres de “kareces” en Afganistan y Pakistan, “foggaras” en el Norte de Africa y “falaj” en los Emiratos Arabes Unidos (National Academy of Sciences, 2001).

Este sistema nació en Irán (Persia) hace miles de años y es tan simple y efectivo que pronto fue adoptado en otras regiones áridas del Medio Oriente y del Mediterráneo. El trabajo empleado en la construcción de los qanats de Irán rivaliza en proporción al requerido en los grandes acueductos de la Roma Imperial; pero mientras que estos son, en la actualidad, sólo una curiosidad histórica, los qanats de Irán han estado funcionando ininterrumpidamente durante más de 3'000 años (Wulff, 1968).

Los qanats se localizan en todos aquellos países que recibieron la influencia de la Cultura Persa; Pakistan, Turkistan, el sur de la URSS, Irak, Siria, Arabia y Yemen. Durante la dominación romana y árabe, éstos sistemas se extendieron al Norte de África y a la Península Ibérica; después de la conquista española, estos sistemas llegaron a México, donde se conocen como “galerías filtrantes”, “galerías” y “apantles con tragaluces” (McNeish, 1972).

Existen muchos escritos antiguos donde se describen las técnicas usadas en la construcción de qanats. Sin embargo, los métodos que actualmente se usan en Irán no varían mucho de los empleados hace miles de años. Wulff (1968) hace una detallada descripción de los métodos que actualmente se utilizan; la técnica descrita por él es la siguiente:

Para iniciar el proyecto, el encargado de las obras realiza un recorrido de campo. Los qanats son, por lo general, construidos en las faldas o laderas de las cadenas montañosas, donde ha sido depositado material aluvial (el cual facilita la infiltración del agua). El encargado examina cuidadosamente estos aluviones, casi siempre desde el nivel más bajo, a fin de marcar los cambios de pendiente de la superficie del terreno así como las ligeras variaciones en la vegetación, las cuales pueden indicar la presencia de aguas subterráneas en un determinado lugar.

Una vez seleccionado el lugar adecuado, se comienza a perforar un pozo auxiliar de prueba. Dos excavadores, llamados “muqanni”, son los encargados de realizar esta tarea. Para ello acomodan una serie de malacates en la superficie del terreno para auxiliarse en la extracción del material excavado. El pozo tiene unos tres pies de diámetro (90 cm). Uno de los hombres trabaja con un azadón y el otro con una pequeña barreta metálica. Otros dos trabajadores se encuentran en la superficie y su trabajo consiste en extraer los cubos, una vez que han sido llenados, por medio del malacate y depositar los escombros entorno al pozo. Si tienen suerte, los muqanni pueden encontrar el manto freático a unos 50 pies de profundidad (15 m) aunque en ocasiones deben excavar entre 200 y 300 pies de profundidad para encontrar agua, lo que hace necesaria la utilización de cuerdas adicionales en los malacates.

Cuando llegan a un estrato húmedo (indicio de un posible acuífero) los muqanni hacen, con una pala de mano, una cavidad hacia el fondo de la arcilla impermeable; en esta cavidad introducen, durante los días posteriores unos cubos de cuero para medir el nivel del agua. Si el agua que corre por la cavidad es mayor que un simple goteo, el encargado puede deducir que se trata de un verdadero acuífero. Entonces se procede a excavar otras cavidades dentro del área adyacente al estrato húmedo, a fin de determinar la posible extensión y producción de agua del acuífero. A continuación el encargado procede a marcar el posible curso el canal subterráneo, a través del cual pasará la corriente de agua; también ubica una serie de ventilas verticales que van desde donde se localizan los pozos auxiliares hasta los puntos donde el canal saldrá a la superficie, pendiente abajo. Para seleccionar la pendiente del canal subterráneo, el encargado determina un declive que varía entre un pie en 500 y un pie en 1’500; el declive debe ser tan suave, de manera que el agua pueda correr por él sin arrastrar los materiales del fondo. Para efectuar las mediciones el encargado utiliza instrumentos

muy sencillos: una gran cuerda y un nivel de mano. Se introduce la cuerda en el pozo auxiliar hasta alcanzar el nivel del agua y se hace una marca donde la cuerda coincide con la superficie del terreno, con ello se determina la profundidad del pozo. Esta medida se utiliza como un parámetro para ubicar la entrada del canal, aunque el canal pueda localizarse en algún punto un poco más abajo del nivel marcado por la cuerda. Una serie de ventilas verticales deben de abrirse para conectar la superficie del terreno con el canal subterráneo; las ventilas se ubican, por lo general, a intervalos de 50 yardas. Para determinar la profundidad de cada ventila, el encargado usa el nivel de mano para determinar la pendiente del terreno; el desnivel se mide ventila por ventila y se va marcando en la cuerda. Cada marca se coloca sobre el lugar donde se ubicó la respectiva ventila y con ella se determina su profundidad, logrando un nivel perfecto con el canal subterráneo. Después se calcula la profundidad adicional para cada ventila, dividiendo el desnivel total que existe entre el nivel que alcanza el agua en el pozo auxiliar y el nivel que tendrá el canal en el sitio donde saldrá a la superficie, entre el número total de ventilas planeadas.

Como los muqanni proceden a excavar el canal subterráneo en forma simultánea, se abren ventilas guías a intervalos de unas 300 yardas para indicar a los trabajadores la profundidad y dirección del canal subterráneo. Este canal se construye a partir del punto donde el agua saldrá a la superficie y se termina donde se ubica el pozo auxiliar. Para proteger la salida del canal de los daños que pueda causar la corriente de agua, por lo general se refuerzan los primeros 15 pies del canal recubriendo las paredes con piedra. El canal subterráneo mide unos 3 pies de alto por unos 5 de ancho. Para que la dirección del canal sea la correcta, los trabajadores siguen un rumbo recto, guiándose por las llamas de un par de lámparas de aceite. El material excavado se deposita en el fondo de las ventilas, para que sea subido a la superficie mediante el sistema de malacates. Los túneles no necesitan reforzarse

cuando son abiertos en arcillas u otros conglomerados bien cementados. Cuando los muqanni se topan con rocas u otros obstáculos imposibles de atravesar realizan un rodeo, lo que hace necesaria la ubicación de nuevas ventilas. Para solucionar estos imprevistos, los trabajadores se basan en su sentido de orientación (que está muy desarrollado) y en el sonido que producen los trabajadores que construyen la ventila.

El mayor peligro a que se enfrentan los muqanni son los bancos de arena y otros suelos inestables que pueden causar el derrumbe del túnel. En estos casos, los trabajadores refuerzan el túnel excavado, conforme van avanzando, con óvalos de arcilla cocida. Los gases y el bajo contenido de oxígeno también son peligrosos. Para evitar una atmósfera sofocante, los muqanni se basan en la observación en sus lámparas de aceite. Conforme se acercan al acuífero, se aproxima otro peligro más; la posible inundación del túnel por una gran corriente de agua. Este peligro es particularmente grande en el momento de conectar el canal con el pozo vertical auxiliar; esto debe hacerse con sumo cuidado para evitar que se genere una corriente que inunde por completo al túnel. Debido a los múltiples peligros a que se enfrentan cotidianamente, los muqanni llaman a los qanats los asesinos. Ellos siempre hacen una oración antes de entrar a un qanats y no se presentan a trabajar los días que consideran de mala suerte.

Lo longitud de los qanats depende de la pendiente del terreno y de la profundidad del acuífero. La longitud, en Irán, varía de 1 a 18 millas, aunque generalmente son de 6 a 10 millas. La producción de agua de cada qanat también es muy variable y va desde un galón hasta 72 galones por segundo...

Las principales ventajas de los qanats son:

- No requieren sistemas de bombeo, por lo que pueden utilizarse en los lugares donde éstos sistemas tengan altos costos de operación;

- No tiene pérdidas por evaporación;
- Su potencial de desertificación es muy bajo;
- Suministra agua de buena calidad que puede utilizarse para consumo doméstico o para la agricultura.

Por otra parte, este método también tiene desventajas, dentro de las más evidentes se encuentran las siguientes:

- La corriente fluye de manera continua a lo largo del año, si el agua no se utiliza, entonces se desperdicia;
- La corriente máxima se genera durante la época de lluvias, cuando la necesidad de riego es reducida y es mínima cuando se requieren mayores períodos de riego;
- No pueden utilizarse a toda su capacidad durante los años de sequía;
- Para riego, los qanats son útiles para los terrenos aluviales que se encuentran en los niveles más bajos, los cuales tienden a tener suelos más pobres y salinos que los aluviones localizados en los terrenos más elevados;
- El agua que sale de qanat es de menor calidad que la que saldría de un pozo excavado en los niveles superiores del terreno aluvión;
- Los qanats son costosos y los primitivos métodos manuales de construcción son muy peligrosos, en años recientes, sus costos han aumentado debido a que se han elevado los niveles de vida y, por consiguiente, el costo de mano de obra(aunque en muchos países, entre ellos el nuestro, la crisis económica ha provocado una situación inversa).

Sin embargo, con la utilización de la ingeniería moderna, la geología, la hidrología y los sensores remotos, el principio en que se basan los qanats pueden jugar un papel muy importante para el futuro suministro de agua en las zonas áridas (Anaya, 1977).

5.5.2. Los Pozos

Los métodos de extracción de agua subterránea que se basan en incrementar la superficie de filtración por medio de incrementos en profundidad, se pueden dividir en pozos entubados de gran diámetro y pozos entubados de diámetro pequeño.

Los pozos verticales excavados a mano se han utilizado desde hace miles de años (Figura 32). El término “pozo” es usado para designar una estructura redonda, cavada a mano en el subsuelo. Sus dimensiones generalmente, varían de 0.9 a 1.8 m de diámetro. Los pozos hechos a mano ocupan poca extensión y son de fácil construcción y mantenimiento. En muchas ocasiones, los pozos son los únicos suministros permanentes de agua para hogares y poblados de las zonas áridas, especialmente durante la temporada de secas.

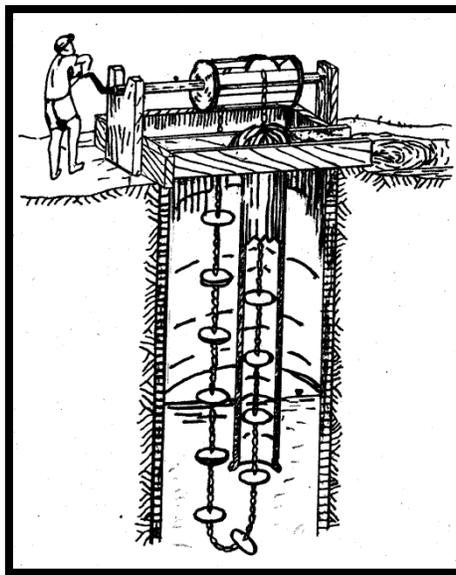


Figura 32. Ejemplo de un pozo

En muchos lugares los pobladores locales se han acostumbrado, a lo largo de muchas generaciones a tener sus propios pozos. Dependiendo de las condiciones naturales del subsuelo y del nivel de la tecnología utilizada existe una gran variación en la construcción de los pozos. El agua es sacada utilizando rudimentarios mecanismos como recipientes de cuero sujetos a largas cuerdas, las cuales pueden jalarse a mano o con la ayuda de tornos. Cuando los pozos son pequeños

(menos de 50 cm de diámetro) es suficiente el trabajo de un solo hombre. Por las condiciones del subsuelo, a veces se sigue un curso en zig-zag a lo largo de la dirección donde se localizan los empalmes de roca sólida y el agua es pasada de mano en mano en pequeños recipientes de cuero u otros materiales, al mismo tiempo que otras personas sacan arena a más e 10m de profundidad para dar la forma de un gran túnel; en muchos casos los excavadores son atrapados (Anaya, 1977.).

Algunas veces, es posible reemplazar los pozos hechos a mano por tubos de perforación, lo que establece una importante etapa de transición. Para ciertos casos, los pozos excavados a mano resultan ser los más ventajosos; por ejemplo, cuando la producción de un acuífero es baja o cuando la inaccesibilidad del terreno dificulta el transporte del equipo de perforación.

Con la disponibilidad de técnicas y equipos modernos para perforar el subsuelo, así como la utilización de una verdadera ingeniería higiénica, para hacer más segura la prevención de enfermedades bacterianas y de parásitos, se ha revivido el interés de la construcción de los pozos. En Afganistan y en la India hay mucha aceptación por los pozos. Desde 1954, cuando se generalizó el uso de las compresoras de aire y de los taladros de roca, se abrieron muchos pozos en la “Deccan Plateau” de la India Central, perforando los bloques de piedra de laca que formaban un bloque imposible de atravesar a mano, en las décadas de los 60's y 70's. en la India se adaptaron muchos pozos con bombas de motores eléctricos o de combustión interna; actualmente se fabrican bombas de buena calidad en muchos países subdesarrollados (National Academy of Sciences, 2001).

Gracias a los modernos taladros y equipos de perforación se pudo llegar a mayores profundidades y obtener mayores cantidades de agua, sin embargo se debe de tener presente que las modernas fuentes de energía presentan un peligro potencial, si no se controla la rapidez con la que se extrae el agua del subsuelo, puesto que ellos son los líderes en desertificación por sobreexplotación de acuíferos (Anaya, 1977).

La National Academy of Sciences (2001) menciona las siguientes limitantes para los pozos excavados a mano:

- No se recomiendan cuando la profundidad del manto freático sea mayor de 20 a 30m;
- Su producción de agua es, generalmente, baja;
- Las técnicas de perforación son desarrolladas y empleadas en muchos países, pero el arte de revestir las paredes no ha prosperado, es necesario descubrir cuáles son las técnicas y los materiales más adecuados para los revestimientos;
- Otra necesidad es conocer técnicas más rápidas y eficientes de perforación.

6. FACTORES A CONSIDERAR PARA LA ELECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LAS OBRAS PARA LA COSECHA DE AGUA

6.1. Elección del sistema de cosecha de agua

Los métodos que se deben emplear para colectar agua de lluvia son específicos para cada región. Sin embargo, al instalar un sistema se deben considerar los siguientes factores (National Academy of Sciences, 2001):

- El suelo (específicamente sus características de evaporación de agua, escurrimiento y erosión);
- La topografía (inclinación y dirección natural del escurrimiento);
- El clima (luz, viento, precipitación, temperatura, etc.)

Debido a que la lluvia en las zonas áridas es intermitente, la estrategia más recomendable es utilizar un sistema integral de muchos colectores de agua de lluvia.

6.2. Construcción de la obra

La obra de captación y almacenamiento de agua debe construirse lejos de estercoleros, fosas sépticas, conducciones de aguas negras o de cualquier otro foco de contaminación. El tamaño y cantidad de las obras de captación y almacenamiento que sea necesario construir para suministro, se determina de acuerdo a los siguientes factores:

- 1) Se debe de considerar el volumen de agua que es consumida por el ganado. En la Tabla 1 y la Tabla 2 se pueden obtener cantidades de demandas de agua aproximadas para consumo por cabeza de algunos animales.

Tabla 1. Demanda de agua diaria para las principales especies domésticas

<i>Especie</i>	<i>Consumo (l/día)</i>	<i>Total requerido al mes (l/mes)</i>
Vacas adultas secas	57	1710
Vacas adultas productoras	90-130	2700-3900
Lechones de 1 kg	0.5	15
Cerdos en crecimiento de 13.6 kg	2.6	78

Cerdos última etapa de crecimiento (54.5 kg)	6.8	204
Cerdos en finalización de crecimiento (100 kg)	8-12	240
Cabras productoras de carne	4.2	126
Cabras productoras de leche	11.2	336
Conejas a ocho semanas de parto	4.5	135
Conejo de ocho semanas de edad	0.5	15
Conejos machos adultos	0.5	15
Conejas preñadas	0.5	15
Pollos de 0.4 kg	0.6	18
Pollos de 1.3 kg	1.6	48
Gallinas de 1.3 kg	3.3	99
Gallinas de 2.2 kg	5.5	165
Gallinas de 4 kg	10	300
Pavos de una semana de edad	0.34	10.2
Pavos de 10 semanas de edad	4-5	120-150
Pavos de 20 semanas de edad	6-8	180-240

Fuente: Anaya (1998) resumido y citado por Fernández et al., 2012.

Tabla 2. Requerimientos de consumo de agua para animales silvestres y domesticados (complemento).

<i>Tipo de Ganado</i>	<i>Tipo de animal</i>	<i>Consumo (l/día)</i>	<i>Total requerido al mes (l/mes/individuo)</i>
Ganado vacuno para carne	Animal maduro	30.3-45.4	909-1,362
	Vaca con becerros	37.85-56.8	1,135.5-1,704
	Becerras	19-30.3	570-909
Ganado ovino	Animales maduros	3.8-7.6	114-228
	Ovejas con corderos	5.7-9.5	171-285
Ganado equino	Caballos	37.8-45.5	1,135.5-1,362
Animales silvestres	Venado bura	3.8-7.6	114-228
	Antílope	3.8-7.6	114-228
	Alce	19-30.3	570-909

Fuente: Datos recopilados por Frasier y Miers (1983), adaptado a SIU (litros).

Los cultivos por su parte, tienen distintas necesidades de agua, dependiendo de la especie y de las variedades, para estimar la cantidad de agua necesaria para un riego se deben tener en cuenta varios datos, como la lámina de riego, coeficiente de cultivo, evapotranspiración potencial, etcétera.

En cuanto a consumo humano, Howard y Bartram (2003) determinaron que un servicio de acceso básico al agua de 20 L/día por persona cubre necesidades

fisiológicas (hidratación) y parcialmente la higiene (lavado de ropa, trastes y alimentos), pudiendo ocasionar problemas de salud; mientras que un servicio óptimo de 100 L/día abastece tanto las necesidades fisiológicas como las de higiene (lavado de ropa, trastes, alimentos, higiene personal, entre otras), asegurando un alto nivel de salud.

2) La duración de la época de secas es un factor de vital importancia, ya que determina el número de días en que el ganado beberá el agua que se captó y almacenó. En las zonas áridas de México se considera que este periodo dura cerca de 10 meses por año.

3) El tipo de forraje influye directamente en la cantidad de agua que toma el animal. Si al ganado se le alimenta con un forraje verde succulento o alguna leguminosa, tomará menos agua. Si se alimenta de rastrojo, heno o en pastoreo libre será necesaria una mayor cantidad de agua.

4) Extensión y topografía del terreno. Si los aguajes no están bien distribuidos se hace imposible el pastoreo y las ganancias de peso del animal disminuyen. Los animales no deben de caminar más de 3 km para beber agua; esta distancia debe ser menor si la topografía del terreno es accidentada. Por otro lado, la topografía se toma en cuenta para aprovechar adecuadamente a los recolectores naturales.

5) Es importante conocer el volumen de agua que en determinado momento puede escurrir y sea factible captar y almacenar en la obra. En este sentido se debe conocer la precipitación promedio anual de la zona y el coeficiente de escurrimiento, en seguida se muestran coeficientes de escurrimiento en base a la pendiente y la textura del suelo para los colectores a nivel de piso (Tabla 3), así como un mapa general de la precipitación promedio anual de las regiones áridas y semiáridas del país (Anexo 1) a manera de referencia.

Tabla 3. Aproximación del valor del coeficiente de escurrimiento.

<i>Cobertura de la cuenca</i>	<i>Pendiente del terreno (%)</i>	<i>Textura</i>		
		<i>Gruesa</i>	<i>Media</i>	<i>Fina</i>
Bosque, malezas	0—5	0.10	0.30	0.40
	5—10	0.25	0.35	0.5

	10—30	0.30	0.50	0.60
Potrero, pastizales	0—5	0.10	0.30	0.40
	5—10	0.16	0.36	0.55
	10—30	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados	0—5	0.30	0.50	0.60
	5—10	0.40	0.60	0.70
	10—30	0.52	0.72	0.80
Terrenos sin vegetación	0—5	0.50	0.70	0.80
	5—10	0.60	0.80	0.90

Fuente: Pizarro (1978) citado por Salinas (2010).

6.2.1. ÁREA DE CONTRIBUCIÓN O DE ESCURRIMIENTO

Myers (1975) citado por Thames (1989), menciona algunas características deseables de los tratamientos de las áreas de captación, entre ellas se encuentran:

- El material empleado no debe ser tóxico para el hombre y los animales.
- La superficie debe ser lisa e impermeable al agua.
- El tratamiento debe tener alta resistencia a la intemperie y no debe deteriorarse a causa de procesos químicos o físicos.
- No es necesario que el material tenga gran resistencia mecánica, pero debe ser capaz de resistir los daños por el granizo o la lluvia intensa, el viento, el tráfico de animales de vez en cuando, el flujo moderado de agua, el crecimiento de las plantas, los insectos, las aves y los animales de madriguera.
- El material debe ser de bajo costo y debe requerir una preparación del terreno sencilla.
- El mantenimiento debe ser simple.

Los materiales usados para mejorar la captación de escurrimientos superficiales, son generalmente de dos clases, ya sea mecánicos o químicos, con una posible tercera categoría que es una combinación de mecánicos y químicos. Muchas sustancias y técnicas nuevas serán probablemente usadas en el futuro, pero una clasificación de la mayoría de las que han sido utilizadas es la siguiente:

6.2.1.1. Métodos mecánicos.

- Uso de áreas naturalmente impermeables (rocas resbaladizas). En ocasiones se presentan de forma natural superficies con afloramientos rocosos, los sistemas de cosecha de agua deben estar situados en una ladera, a fin de que el agua interceptada sea dirigida aguas abajo a un sistema de almacenamiento (Figura 33); a pesar de ser un método sencillo y de bajo costo, la eficiencia de este es menor comparada con la implementación de materiales externos, Burdas (1975) ha estimado una eficiencia del 45 % de escurrimiento con este método (Thames y Fischer, 2009).

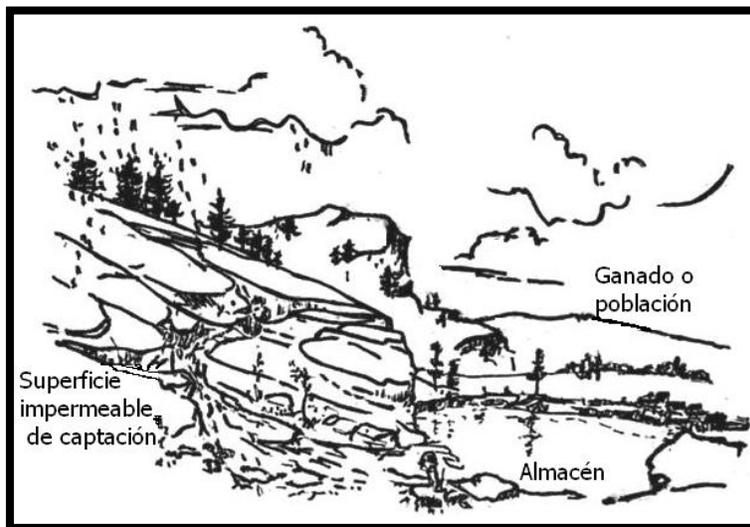


Figura 33. Ejemplo de un sistema cosechador de agua de lluvia (FAO, 1976)

- Remoción de rocas y construcción de zanjas para la colecta de los escurrimientos de las laderas.
- Remoción de la vegetación más formación y compactación de las áreas de colecta de agua. La composición del suelo es un factor importante para la implementación de esta técnica; suele ser más efectivo en suelos de textura limosa o franco arcilloso, aunque la erosión es la desventaja principal de este método, en estos casos se recomienda construir un bordo aguas arriba para reducir la velocidad del escurrimiento (Thames y Fischer, 2009).
- Uso de láminas de hierro y techos de metal corrugado. Otros materiales similares incluyen películas o láminas de plástico, láminas de plástico butil, de aluminio y techos de lámina de cartón. En ocasiones estas cubiertas son

revestidas uniformemente con grava para protegerlas de la radiación solar y de daños mecánicos (Figura 34), la preparación de este método con un equipo de cuatro a cinco personas dura aproximadamente 16 horas (Frasier y Myers, 1983).



Figura 34. Colocación de la capa de grava (Frasier y Myers, 1983)

- Los “caminos de captación” y “tanques en planos inclinados” en Australia, son técnicas con las cuales se colocan arcillas bajo la superficie, desde el subsuelo hacia la superficie para mejora el escurrimiento.

6.2.1.2. Métodos químicos.

- Algunos de los principales químicos usados para aumentar el escurrimiento incluyen: ceras como la parafina (Figura 35), sales (NaCl , Na_2CO_3 , etc.), látex, aceites pesados, rosinato de sodio, cloruro de amonio diaquil cuaternario, jabón metálico, aminoácidos grasos, metil silanolato de sodio y silicones. Myers y Fraiser (1969) han reportado que al utilizar silicones como repelentes del agua, se tiene una eficiencia de 90 %, sin embargo después de cuatro años esta eficiencia se reduce a 60 %, además de implicar problemas de erosión (Thames y Fischer, 2009).



Figura 35. Aplicación de cera parafina sobre la superficie de contribución o captación (Frasier, 1975).

- Diversas formulaciones de asfalto tratado, asfalto con fibra de vidrio y emulsiones asfálticas pueden emplearse. Una mezcla de fibra de vidrio o polipropileno con asfalto pueden usarse para incrementar el volumen de captación con resultados exitosos (Figura 36); la mezcla se coloca sobre la superficie, siendo el asfalto el agente impermeabilizante, esta mezcla tiene una vida útil de por lo menos cinco años (Thames y Fischer, 2009).

Frasier y Myers (1983) mencionan que una preparación común de un terreno de 960 m², con un equipo de cuatro a cinco personas llevaría seis horas (24-30 horas de trabajo) y que la aplicación de la capa impermeabilizante llevaría en promedio 3 horas con el mismo número de personas.



Figura 36. Aplicación de la emulsión asfáltica con una base de fibra de vidrio (Frasier, 1975).

- Cemento sobre el suelo de alrededor de 10 cm de grueso. El uso de este material se ha ido generalizando, ya que a pesar de ser relativamente caro, tiene una vida útil de aproximadamente 20 años, no obstante requiere mantenimiento debido a la presencia ocasional de grietas, mismas que pueden ser tratadas de forma rápida y económica con emulsiones de asfalto o fibra de vidrio (Thames y Fischer, 2009).

Estos métodos también son empleados para reducir la infiltración de los depósitos para el almacenamiento del agua, por lo que la explicación de su manera de actuar será detallada en el apartado sobre reducción de la capacidad de infiltración.

6.2.1.3. Funcionamiento de los materiales

Todas las superficies de captación artificial están sujetas a diversas clases de daños y se requieren esfuerzos periódicos para su mantenimiento y óptimo funcionamiento. Los roedores también pueden perforar orificios por sus roeduras y excavaciones, el crecimiento de las plantas también puede ocasionar daños, así como la presencia de insectos, el vandalismo, la acción del viento y fallas en el material debido a oxidaciones, ataque de ozono y rasgaduras (Dedrick, 1973 citado por Frasier, 1975). Además, la radiación ultravioleta daña al hule y a los plásticos. Las posibles soluciones a estos problemas incluyen: el uso de esterilizantes de suelo antes de la instalación de la placa de captación y distribución para controlar las incisiones de las plantas, usar instalaciones abiertas para el almacenamiento en áreas donde cae nieve, utilizar materiales reforzados para prevenir daños (como los ocasionados por el ozono), el uso de materiales no sujetos a deformación, tales como el hule butil y el uso de capas de grava para proteger las películas plásticas.

Para tener un panorama más claro del funcionamiento de estos métodos de modificación de la superficie del suelo para aumentar el escurrimiento, abajo se muestra un cuadro comparativo de la eficiencia calculada de los diferentes tratamientos o materiales empleados (Tabla 4).

Tabla 4. Eficiencia de los escurrimientos de los métodos y materiales usados en los procedimientos de cosecha de agua.

<i>Tratamiento</i>	<i>Escorrentía (%)</i>	<i>Vida estimada del tratamiento (años)</i>
Afloramiento de roca natural ⁱ	20-40	20-30
Desmante o limpieza ⁱ	20-30	5-10
Compactación del terreno ⁱⁱ	30-60	Indefinido
Suelo suavizado ⁱ	25-35	5-10
Tratamiento con sodio ⁱ	40-70	3-5
Tratamiento con sodio ⁱⁱ	40-70	Indefinido
Silicón repelente al agua ⁱ	50-80	3-5
Cera parafina ⁱ	60-90	5-8
Concreto ⁱ	60-80	20
Membrana cubierta con grava ⁱ	70-80	10-20
Plástico cubierto con grava ⁱⁱ	60-80	20-25
Asfalto con fibra de vidrio ⁱ	85-95	5-10
Asfalto recubierto con polietileno reforzado ⁱⁱ	85-95	10-15
Asfalto con polipropileno reforzado ⁱⁱ	85-95	10-15
Hule artificial ⁱ	90-100	10-15
Láminas de metal ⁱ	90-100	20

Fuente: Frasier, 1975 (i) y Cluff y Dutt (1975) (ii) citados por Thames y Fischer, 2009

6.2.1.4. Estimación de la superficie de captación requerida

Generalmente, para estimar el área de captación primeramente se debe determinar el volumen de agua que se pretende cosechar, en base a los requerimientos y posibilidades; después obtener los datos de precipitación promedio anual y escurrimiento promedio, en el caso de colecta directa del suelo, mientras que para la implementación de impermeabilizantes o techos se utiliza el porcentaje de eficiencia de los materiales, quedando de la siguiente forma las fórmulas generales:

$$a) \quad A = \frac{VT}{PP * C} \dots \dots \dots \text{captación a nivel piso}$$

$$b) \quad A = \frac{VT}{PP * E} \dots \dots \dots \text{captación con superficies modificadas o cubiertas}$$

Donde:

A: área en m²

VT: volumen total cosechado en un año en m³ =(litros/1000)

PP: precipitación promedio anual en m

C: coeficiente de escurrimiento del suelo

E: eficiencia del método (0/100)

6.2.2. RECEPTOR DE AGUA Y/O ALMACÉN DEL AGUA COSECHADA.

Thames y Fischer (2009) establecen que un sistema completo de cosecha de agua de lluvia cuenta con un almacenamiento para el agua de lluvia cosechada: existen tres tipos de almacenes básicos; depósitos excavados, bolsas hechas de plástico o hule y tanques de concreto o acero. Dedrick (1975) menciona que el sistema de almacenamiento más adecuado para un sitio depende de las condiciones del suelo, accesibilidad, costo de la obra y materiales, y vida útil requerida (Thames y Fischer, 2009), párrafos abajo se describen brevemente los tipos de almacenes.

6.2.2.1. Los depósitos excavados

Son los almacenes más comunes, de fácil construcción y particularmente convenientes en lugares con suelos profundos y donde no son disponibles otros materiales; comúnmente son compactados o tratados con algún material o cubierta para evitar la infiltración (Thames y Fischer, 2009).

Una vez considerados todos los factores necesarios para el diseño de un sistema de cosecha de agua de lluvia, se procede a realizar la excavación. Por lo general se hace en forma de pirámide truncada, de sección invertida y con taludes mínimos de 1:3. Esto permite hacer la excavación más rápidamente, y facilita la compactación de los taludes.

Terminada la excavación se quitan las piedras, ramas o cualquier objeto punzocortante que pueda romper o perforar la película impermeabilizante que se va a utilizar. Si el terreno lo requiere, se moja y se compacta con pisones manuales hasta darle la mayor firmeza posible, en algunos casos, como se ha venido mencionando se le añaden sustancias químicas para disminuir la infiltración.

6.2.2.2. Bolsas para almacenar aguas pluviales.

es un tipo de sistema cerrado que reduce las pérdidas por evaporación y filtración (Figura 37); estas bolsas cuentan con un orificio para la entrada del agua, otro para la salida, y uno para la demasía, son muy susceptibles al vandalismo y a insectos, pero con un buen cuidado esto puede ser minimizado (Thames y Fischer, 2009). En el mercado comercializan estas bolsas con diferentes dimensiones y capacidades; desde un metro cúbico hasta cuatrocientos, es decir 400,000 l. Sin embargo, los costos de estas bolsas varían dependiendo de la capacidad, la composición, y sobre todo la marca comercial, encontrando bolsas desde 8 mil pesos hasta arriba de los 200 mil pesos mexicanos.



Figura 37. Ejemplo de una bolsa para almacenamiento de agua (bolsa cisterna).⁷

6.2.2.3. Cisternas de concreto o metal

Cisternas construidas a base de metal o concreto disminuyen pérdidas por filtración y ayudan a reducir costos en los materiales para la reducción de la evaporación, además cuentan con un periodo de vida largo (Thames, 1989).

Pueden ser construidos en la superficie del terreno o bien estar bajo el suelo, para ello se hace una excavación previa para después proceder a construirlo, generalmente estos últimos son hechos de concreto. Diferentes diseños de construcción son utilizados en los sistemas de cosecha de agua pluvial, como se pudo observar en el capítulo cinco de esta monografía.

⁷ <http://depositosdeliquidados.com/depositos-bolsa-flexibles/>

6.2.3. REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN DEL SUELO

Dixon (1980) menciona el concepto de la interface aire-tierra, que establece que la microrrugosidad y la macroporosidad de la interface aire-tierra controlan la infiltración por regular el flujo de aguas y remover el aire del suelo en los subyacentes sistemas de macro y microporos. Por ello, es posible incrementar la infiltración en el suelo mediante la manipulación de estos dos factores. Una superficie con microrrugosidad y macroporosidad tiene la capacidad de infiltrar lluvias de gran intensidad; mientras que una superficie microporosa y microplana repele gran cantidad de agua de lluvia que cae sobre ella. La macroporosidad y la microrrugosidad actúan como un embudo que conduce el agua de lluvia dentro del suelo y saca el aire de él.

Es así que, en muchos casos es indispensable realizar modificaciones que impermeabilicen la superficie del suelo y, por consiguiente, incrementen la cantidad de escurrimiento o reduzcan la infiltración. Para disminuir la infiltración, Thames y Fischer (2009) indican que existen tres caminos para retener el agua, los cuales son:

- Alteración del suelo.

En algunos casos solo se necesita una pared rocosa que permite contener el agua de escorrentía. Teniendo vegetación y rocas además de compactar un poco el suelo nos puede ayudar a incrementar el nivel de captación. Con este sistema el único problema es la erosión.

Cuando el riesgo de erosión no es excesivo y los costos de la alteración a ese terreno son reducidos, estos métodos pueden ser muy económicos para colectar el agua (National Academy of Sciences, 2001).

- Tratamientos químicos.

Lo que se trata de hacer con este tipo de métodos es llenar los poros de la corteza terrestre y hacer el suelo repelente al agua, mediante la utilización de productos químicos tales como sales de sodio, silicones, látex, asfalto y ceras.

- Cubiertas de suelo.

Esto se refiere al cubrimiento de toda el área donde se piensa almacenar el agua. Para esto se utilizan diversos tipos de cubierta de diferentes materiales.

6.2.3.1. Uso de materiales químicos

Por razones económicas, en la mayoría de las zonas áridas de los países en desarrollo se utilizan canales y reservorios construidos con tierra. Debido a la porosidad de los suelos muchos de estos reservorios y canales sufren serias pérdidas de agua por infiltración. Además, estas pérdidas por infiltración pueden ocasionar salinizaciones, anegamientos y erosión en los suelo adyacentes.

La infiltración puede reducirse si las paredes de los reservorios y conductos son construidos con materiales impermeables. En la actualidad se cuenta con diversos materiales y técnicas impermeabilizantes que tienen una alta potencialidad al respecto. A continuación se mencionan algunas de las técnicas y materiales que se han generado a fin de reducir las pérdidas de agua por infiltración.

vi. Bentonita

Una excelente propiedad de la bentonita (arcilla coloidal) es que cuando se humedece aumenta varias veces su volumen original. El polvo de la bentonita suele mezclarse con el suelo o bien, formar una capa de pura arcilla que puede colocarse sobre o bajo la superficie del suelo, aunque cuando se deja la capa sobre la superficie el tratamiento tiene una duración menor. Cuando el suelo tiene pequeñas cantidades de arena, basta con una pequeña aplicación de 4.84 kg/m² de bentonita, pero dicha aplicación puede aumentar de 14.5 a 19.4 kg/m² cuando el suelo es muy arenoso (Boyer and Cluff, 1972 y Rollins, 1970; citados por Cluff, 1981).

Ciclos alternativos de sequía y humedad reducen la afectividad del sellado con bentonita después de 3 o 4 años, por lo que no se recomienda la implementación de esta técnica en lugares donde se presentan este tipo de condiciones ambientales, de manera frecuente.

vii. Sales de sodio

El calcio presente en el suelo es una de las principales causas que produce las pérdidas de agua por infiltración. Esto se debe a que el calcio ocasiona que las partículas de arcilla se agrupen en agregados, formando grietas y una estructura porosa que facilita el flujo del agua a través del suelo. Para solucionar esta situación, se recomienda la utilización de sales de sodio (ya sea en forma de cloruro, silicato, polifosfato o carbonato) (National Academy of Sciences, 2001).

Las sales sódicas actúan como dispersantes o defloculantes del suelo y precisamente una de las características del fenómeno de dispersión o defloculación, es una disminución en la velocidad de infiltración del agua como consecuencia del acarreo de partículas de arcilla defloculada, que son depositadas por el flujo de lixiviación en los espacios existentes entre el limo y la arena. Al reducir el proceso de infiltración, las sales sódicas aumentan el escurrimiento superficial. El éxito de este tratamiento depende de no agregar excesos de sal, y al mismo tiempo mantener el nivel apropiado de sodio absorbido.

El grado de aplicación de las sales de sodio, cuando se usan para reducir la infiltración, debe ser mayor que el empleado en la construcción de los captadores, a fin de lograr un sellado adecuado contra la presión hidrostática. Dicho grado de aplicación depende, principalmente del contenido de arcillas que presente el suelo, aunque por lo general se utiliza de un kilo a kilo y medio por metro cuadrado. La vida útil del tratamiento de sodio depende de la calidad del agua almacenada; si el agua almacenada presenta pocos disolventes sólidos (menos de 500 ppm) y el sodio es el ión predominante en el agua, el tratamiento puede ser eficiente durante años. Si en el agua se encuentran concentraciones relativamente altas de calcio y magnesio, el sistema puede fallar en un tiempo relativamente corto.

En ocasiones se hacen trabajos adicionales en los captadores hechos con tratamientos de sodio, a fin de evitar que los escurrimientos transporten algunas arcillas dispersas. Sin embargo, Cluff (1981) menciona que cuando el total de sólidos disueltos es menor a 200ppm se considera que el agua contiene más sodio que calcio y magnesio, lo que asegura que el reservorio tratado con sales de sodio

para evitar infiltraciones, y abastecido por un captador hecho también con sales de sodio, tengan una vida útil prolongada.

➤ Cloruro de sodio

La aplicación de cloruro de sodio es más recomendable en suelos de texturas ligeras con drenaje interno rápido y que no requieran grandes cantidades de agua de lluvia para lixiviar las sales formadas, como en el caso de regiones áridas y semiáridas (Velasco, 1991).

➤ Carbonato de sodio

Es más recomendable el uso del carbonato de sodio en suelos de texturas finas donde el drenaje interno, aun siendo lento, no es limitante dado que el electrolito formado (CaCO_3) no requiere ser lixiviado (Velasco, 1991).

viii. Selladores polímeros

El trabajar con selladores polímeros (silicones, por ejemplo) en suelo de textura media (donde las concentraciones de calcio y magnesio son más elevadas) es lo más adecuado. La aplicación de estos selladores en los reservorios existentes es sumamente sencilla, ya que basta con agregarlos al agua. El grado de aplicación se encuentra en una proporción de un litro de sellador por cada 1,000 litros de agua almacenada. Se recomienda aplicar este método cuando el reservorio es nuevo o se encuentra vacío, humedeciendo el suelo a una profundidad de 152 a 304 mm con una solución que contenga al sellador en una proporción volumétrica de 1 a 100 y compactar el terreno. A pesar de que no se ha determinado la reducción de las pérdidas por infiltración mediante la utilización de selladores polímeros, se están realizando pruebas en distintos tipos de suelo (Cluff, 1981).

ix. Derivados de petróleo

Las sustancias derivadas de petróleo como asfalto y parafina, tienen la propiedad de aglutinar las partículas del suelo formando con éstas una capa continua o sello que impide la penetración del agua en el perfil del suelo (Velasco, 1991).

➤ Asfalto

La aplicación de este derivado del petróleo no puede realizarse directamente al suelo; se requiere de algún material delgado y continuo, al que se adhiera el asfalto uniformemente. Para ello se han utilizado varios tipos de materiales que permiten aplicarlo con la uniformidad debida, como la fibra de vidrio y el henequén (Velasco, 1991).

El asfalto puede utilizarse en la construcción de los reservorios cubriéndolo con una capa de tierra. La cantidad de asfalto requerido por la membrana está en función del tipo de subsuelo pero no debe ser menor a 6.8 L/m^2 cuando se utilizan técnicas convencionales de aplicación. La capa de asfalto puede cubrirse con una capa de tierra que tenga un espesor adecuado para evitar la degradación atmosférica y los daños mecánicos. Utilizando una capa de materiales finos (como arena) en la superficie de la capa de asfalto y sobre ella otra hecha con grava gruesa o guijarros se obtiene una defensa muy resistente a la erosión. También se han probado capas de fibra de vidrio que protejan a la capa de asfalto en reservorios pequeños. Los asfaltos pueden ser a base de solventes o a base de agua. Las emulsiones de cationes o de aniones pueden aplicarse por rociadores (spraying) o mediante cepillos industriales de cerdas suaves. Los asfaltos a base de solventes deben de calentarse por arriba de los $65.6 \text{ }^\circ\text{C}$ para poder aplicarse.

Si la aplicación es con rociadores, primero debe aplicarse una capa de 1.1 L/m^2 , seguida por otra de 0.025 a 0.033 kg/m^2 de fibra de vidrio entretejida. Una capa adicional de 2.26 L/m^2 se extiende sobre la fibra de vidrio. En el caso de utilizar cepillos, las fibras de vidrio se colocan directamente sobre la superficie del suelo y el asfalto se extiende sobre ellas con ayuda de los cepillos. Después de la primera aplicación, se utiliza un sellador de asfalto-arcilla de emulsión tipo superficial en una proporción aproximada de 1.51 L/m^2 . En este método se requiere darle esta segunda pasada a todo el reservorio para completar el tratamiento (Cluff, 1981). Otra ventaja de esta técnica es que el asfalto puede aplicarse únicamente con el auxilio de los cepillos, evitando el uso de maquinaria especializada. Sin embargo, en algunos países es difícil obtener fibras de vidrio.

Cuando se utiliza un tratamiento de asfalto-polietileno-asfalto-astillas en un reservorio para evitar la infiltración, se recomienda utilizar PE 6 mil, además de que la aplicación de asfalto debe ser lo doble de lo que normalmente se emplea. Por otra parte, es necesario colocar mastic and tape en los lugares de sobreposición de las láminas de plástico. Así mismo, se recomienda utilizar una cubierta protectora de cuando menos 152 mm (Frobel y Cluff, 1976, citado por Cluff, 1981).

Las ventajas que ofrece el asfalto son: su bajo costo, sus características impermeabilizantes y que puede aplicarse fácilmente por capas. Los colectores de asfalto que se construyen en lugares muy inclinados tienen una vida útil de 4 a 5 años. Los problemas causados por la inestabilidad del suelo, la oxidación y penetración por la germinación de plantas se pueden resolver cubriendo el asfalto con plástico o fibra de vidrio.

➤ Parafina

La parafina común es una sustancia orgánica que se ha aplicado a la superficie del suelo como material repelente al agua para incrementar el escurrimiento superficial del agua de lluvia; la parafina más adecuada para esto, es aquella que presente su punto de fusión a la misma temperatura del suelo de la época más caliente del año. La calidad de agua escurrida con este tratamiento resulta de buena calidad; la concentración salina no es considerable; y no existen problemas de sedimentos (Velasco, 1991).

En la época pasada se utilizó la cera de parafina como un sellador del suelo. La cera granulada, extendida sobre el suelo y revertida por el sol fluye dentro sus poros y forma una capa que impide el paso del agua. La cera también puede fundirse y aplicarse directamente sobre el terreno. En algunas pruebas, los tratamientos con cera lograron que el 90% del agua que llovía escurriera. El agua obtenida mediante este método tiene un bajo contenido de sales (unos 50 gr/l) y casi nada de materia orgánica.

6.2.3.2. Reducción de la infiltración mediante coberturas del suelo

En lugar de hacer la superficie del suelo impermeable, en algunos casos resulta mejor cubrirlo con un material repelente al agua. Tal es el caso de los suelos porosos o inestables, donde el mantenimiento de los otros métodos resulta demasiado costoso. Las hojas delgadas de metal, caucho y/o plásticos son una buena alternativa para construir colectores de agua de lluvia a bajos costos; sin embargo, estos materiales son fácilmente dañados por el viento. Si los colectores construidos con estos materiales reciben el mantenimiento adecuado, pueden tener una vida útil de más de 20 años. Los materiales que se pueden utilizar como coberturas del suelo, se detallan a continuación.

x. Membranas sintéticas

Para este caso, membrana se le llama a una película o capa continua de un material sintético, flexible, impermeable al agua que se aplica a la superficie del suelo, con el propósito de incrementar el escurrimiento superficial o para disminuir pérdidas por infiltración en reservorios. Dentro de estas se encuentran los polímeros y los hules sintéticos (Velasco, 1991).

Por lo general, el uso de membranas sintéticas como el polietileno (PE), cloruro de polivinil (PVC), goma elástica de butyl e hypanol y polyetilene clorinitado (CPE) tienen un costo mucho mayor que el tratamiento con sales de sodio. Sin embargo, capas de PE, y en ocasiones de PVC compiten muy bien con la cementación del suelo y con la bentonita, en especial cuando el material tiene que transportarse a lugares muy distantes. Una ventaja de estos materiales es que su probabilidad de éxito es muy alta cuando se instalan adecuadamente. El inconveniente de la goma butil es que no puede resistir la degradación atmosférica por más de 15 años, mientras que el PE y el PVC, cubiertos con tierra pueden tener una vida útil durante un lapso aceptable de tiempo.

Además de proteger a la membrana contra daños mecánicos, la cubierta de tierra también reduce de manera significativa las pérdidas por infiltración que pueden ocurrir por una ruptura accidental de la membrana, por lo que se recomienda esta práctica. La membrana debe mantenerse libre de materiales cortantes y de

vegetación, además de estar plana. Es muy importante una unión adecuada entre los extremos de las membranas. El PE generalmente se une con mastic & tape. Los demás materiales pueden unirse utilizando cementos de tipo solvente (Cluff, 1981).

➤ Polietileno

Material plástico que debe presentar las siguientes características; color negro y un grosor de 800 a 1000 gauges (1/128 de pulgadas). El pegado se realiza a base de calor, utilizando tiras de teflón para evitar que la fuente de calor dañe el plástico. Es poco resistente a los ataques del intemperismo (especialmente al ozono y rayos ultravioletas), por lo que debe de protegerse con una capa de tierra o de arena y piedra acomodada para darle firmeza. La vida útil del material en estas condiciones es de 10 a 12 años.

➤ Hule butilo

Entre las membranas de hules sintéticos usados se encuentran: el hule butilo, el EPDM (monómero diénico de etileno propileno) y el CSP polietileno clorosulfonado; todas las membranas de hule sintético pueden ser empleadas como materiales impermeabilizantes expuestos, pero debe protegerse contra daños mecánicos (Velasco, 1991).

Su presentación como impermeabilizante es de sabanas de 33x33 m y 20 milésimas de grosor (2,000 gauges); puede tener diferentes colores. Su vida útil alcanza los 12 años si se cubre con piedras y arena y se protege contra los daños mecánicos.

De acuerdo a Velasco (1991), las membranas de hule sintético son resistentes a muchos procesos del intemperismo que ocasionan alteraciones en otras membranas y películas. Sin embargo, el hule butilo es susceptible al ataque del ozono conjuntamente con temperaturas elevadas y a la ruptura por estiramiento. Aunado a esto, la principal desventaja de estos materiales es el alto costo, sin embargo, se pueden instalar fácil y rápidamente. Cuando el terreno lo requiera, se recomienda la esterilización de la capa superior del suelo, para evitar el desarrollo de malas hierbas.

xi. Cementación del suelo

La cementación del suelo puede definirse como una mezcla de cemento portland, agua y suelo. La cantidad de cemento portland que se requiere, se incrementa en la medida que existen partículas más finas en el suelo, aunque por lo general se aplique una proporción de 7 al 15% por volumen. Los suelos más adecuados son aquellos en que todas sus partículas pueden pasar por una criba de 76.2 mm. Un suelo donde predominen las partículas del tamaño de las gravas, no es adecuado para implementar esta técnica; si no se encuentra el suelo ideal para aplicar la cementación, este se puede traer de un área adyacente (Cluff, 1981).

Para esta obra, primeramente se remueve mecánicamente la superficie del suelo a una profundidad de 152 a 203 mm. El cemento portland se distribuye de manera proporcional y se mezcla con el suelo utilizando un arado giratorio, adicionando el agua necesaria para obtener un resultado óptimo; la mezcla es, posteriormente compactada con una aplanadora hasta que se obtiene una consistencia adecuada; la capa así formada, es regada con agua durante un lapso de aproximadamente 7 días, una planta central mezcladora puede utilizarse cuando se trata de grandes proyectos de mejoramiento del suelo. Si se aplica de manera adecuada, el producto terminado se considera de baja permeabilidad y de gran durabilidad.

xii. Cubiertas de concreto

Para la construcción de un firme de concreto armado se utiliza la inclinación natural del terreno cuyo propósito de permitir el escurrimiento del agua de lluvia a una cisterna de almacenamiento. En primer término debe hacerse el desmonte del área, seguido de un pulimento para terminar con una compactación del 95% del terreno, para lo que se humedece el terreno. Si la carencia de agua es un factor limitante, debe esperarse una lluvia, o si esto no es posible, se efectúa la compactación en seco hasta lograr un efecto máximo.

En el caso de la impermeabilización de cisternas, las capas de concreto utilizadas para proteger los reservorios, tienen por lo general, un grueso de 51 a 102 mm, reforzadas con una malla ligera de alambre. La correcta instalación de una capa de concreto requiere de mano de obra calificada y de equipo especial, que no siempre

se encuentra en las regiones remotas. El concreto debe ser tratado para ayudarlo a obtener la impermeabilidad y la resistencia que requieren los reservorios (Cluff, 1981).

Tanto el fondo como las paredes de los reservorios deben ser compactados y alisados adecuadamente. El equipo y métodos a utilizar dependen de las características del subsuelo. Se deben evitar los suelos expansivos y secos porque ponen en peligro la capa de concreto, por sus expansiones y contracciones.

Un plástico reforzado cubierto con mortero es una variante de este método, en el que una lámina de PE o de PVC se usa como una membrana para evitar la infiltración y una capa de mortero reforzado con malla de alambre funciona como cubierta protectora: el plástico, la malla de alambre y el mortero se extienden desde la parte superior del reservorio, en el cual se ancla para evitar infiltraciones en la parte superior, el mortero debe ser lo suficientemente grueso para que cubra por completo a la malla de alambre. Se recomienda utilizar una malla con una pulgada de apertura para facilitar la aplicación del mortero. Cuando se usan mallas con una apertura mayor a 20.54 cm, el mortero puede colocarse sobre la superficie de la malla y extenderse con la ayuda de rastrillos.

Ocurren menos rupturas cuando se usa un terminado tosco a base de cemento y arena que cuando se emplea una pasta fina de mortero y arena. Éste método puede instalarse fácilmente utilizando sólo mano de obra y una reducida cantidad de equipo. Además, la cubierta con mortero sólo puede aplicarse en los costados y en el fondo del reservorio, la membrana de plástico puede cubrirse de tierra; con esta medida se logran reducir los costos de manera considerable (Cluff, 1981).

xiii. Cubiertas de mezcla asfáltica

El asfalto con concreto es la capa más durable, impermeable y resistente a la erosión hídrica, pero su costo es demasiado alto. Se debe tener cuidado en las características de las mezclas, las propiedades del subsuelo y el diseño. Las capas pueden aplicarse con máquinas normales de pavimentación, por maquinaria especializada o utilizando solo fuerza de trabajo (por ejemplo, en los costados inclinados).

Otro material con buenas propiedades de impermeabilizante y que se mantiene flexible durante un largo periodo de tiempo es la mezcla de asfalto con tiras de goma, aunque tiene la desventaja de requerir equipo especializado para su instalación (Cluff, 1981.).

xiv. Lámina metálica

Estas son utilizadas generalmente para aumentar el escurrimiento superficial en el área de captación. Estas áreas se construyen al ras del suelo, principalmente para disminuir costos: bloques de madera tratados con algún preservativo o bien durmientes de ferrocarril, pueden anclarse en el suelo, sobre los cuales se clavan o atornillan las unidades laminares; el escurrimiento producido es interceptado por un canal metálico y conducido por un tubo a una cisterna. La lámina metálica no debe estar en contacto con el suelo y menos si este es salino (Velasco, 1991).

Las láminas que se utilizan para este propósito deben ser galvanizadas para evitar su oxidación y el mantenimiento consiste en conservar las unidades metálicas sujetas firmemente. A este tipo de área de captación se le considera una vida útil mayor a veinte años (Velasco, 1991).

xv. Piedra laja

Otro material potencial para aumentar el escurrimiento superficial es la piedra laja. Esta piedra es un material poroso, característica que se convierte en una de sus limitantes para su empleo como impermeabilizante en áreas de captación. Sin embargo, cuando la piedra es colocada sobre un terreno de moderada pendiente, debidamente emboquillada con cemento puede producir escurrimientos superiores al 60% (Velasco, 1991).

6.2.4. LOS CAMINOS DE CAPTACIÓN

Un camino de captación consiste de surcos o lomos paralelos de tierra compactada inclinada y desnuda teniendo una pendiente que le permita conducir los escurrimientos sin riesgo de causar erosión en los canales de conducción. Este método aumenta los escurrimientos por la reducción de las depresiones y de las pérdidas por infiltración. Los factores más importantes que se deben considerar en su instalación son:

- Incrementar la pendiente de la superficie;
- La superficie del suelo contenga suficiente arcilla;
- Compactación y nivelación de la superficie por aplanadoras;
- Eliminación de malezas;
- Conservar las pendientes de los canales de conducción dentro de un rango razonable.

Se estima que en 1974 existían 2,500 caminos de captación (con una superficie promedio de 1.5 ha) en el oeste de Australia; de igual manera que esta cifra aumentó a más de 3,500 en 1980 (Laing, 1981).

6.2.5. OTROS COMPONENTES DE LOS SISTEMAS COSECHADORES

6.2.5.1. Desarenadores

Son pequeñas fosas y van intercaladas a lo largo del canal colector, su función es detener el azolve y reducir la velocidad de la corriente. Se construyen los que sean necesarios, aunque generalmente basta con tres.

6.2.5.2. Vertedor de demasías

Es un canal de salida que se construye en la corona de la excavación y de una dimensión tal que permita salir el doble del volumen de agua que llega por el canal colector. Tienen la finalidad de evitar derrames de la corona que puedan dañar los

bordos o embalses del reservorio. Estos bordos pueden sembrarse con algún pasto perenne para evitar la erosión.

6.2.5.3. Filtros

Estos filtros son instalados en caso de que el agua de lluvia sea para consumo humano principalmente, para eliminar los gérmenes que pudiera tener el agua. Los hay de diferentes tipos, desde los prefabricados hasta los caseros (Figura 38Figura 37); los filtros caseros más comunes son los compuestos por arena, grava o piedra, dependiendo del volumen de agua que se pretenda filtrar.

Un ejemplo de filtro casero para uso domiciliario lo constituye el filtro lento de arena, este alcanza una eficiencia de 99.9 % de eliminación de microorganismos y parásitos siempre y cuando sea bien utilizado. El filtro está constituido por un recipiente de plástico, concreto o metal con tapa hermética; a este recipiente primeramente se le adecúan tubos de entrada y de rebose, para en seguida colocarle las capas de grava, gravilla (2-3 cm de Ø), y arena (0.15-.35 mm de Ø), dispuestas en ese orden de abajo hacia arriba, se tienen que esperar de dos a tres semanas para poder utilizar por primera vez el filtro (CEPIS-OPS, 2005).



Figura 38. Filtro prefabricado (A)⁸ y filtro lento de arena casero (B).

⁸ <http://aguapura.ecodeter.com/filtrosdeagua.asp>

6.2.5.4. Abrevaderos

Los sistemas de cosecha de agua de lluvia destinados a uso pecuario incluyen siempre un abrevadero para abastecer de agua al ganado. Estos bebederos, ya sea de madera o cemento, generalmente se suministran de agua directamente de las cisternas de almacenamiento, se les instala un flotador para regular el nivel del agua.

6.2.5.5. Bombas

Cuando el sistema de almacenamiento de agua de lluvia es mediante una cisterna subterránea y existe escasa pendiente o se requiere transportar el agua a zonas más como casas habitaciones, es necesario incluir una bomba dentro de los componentes del sistema. Las hay de tipo manual y eléctricas; las bombas manuales se basan en el principio pistón-embolo, donde el movimiento del émbolo produce una corriente de agua continua, las hay de diferentes formas y materiales. Estas bombas son las más sencillas y económicas del mercado, además existen algunos modelos que pueden fabricarse manualmente.

6.2.5.6. Cercado

Es de suma importancia la construcción de un cerco perimetral que impida la entrada del ganado o de cualquier otro animal al interior del embalse. Con ello se protege la película impermeabilizante y se evita la contaminación del agua.

6.2.6. CONTROL DE LAS PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN EN LAS SUPERFICIES DE AGUAS

Además de las pérdidas por infiltración, las producidas por evaporación frecuentemente exceden al volumen de agua utilizada. En las regiones áridas, la pérdida de humedad por evaporación constituye un problema muy grave. Se estima que en diecisiete estados de Norteamérica se evapora agua por valor del 45% de la que se utiliza para el riego (Orson y Vaughn, 1985).

Para que se lleve a cabo la evaporación se requiere de una fuente de energía que vaporice el agua y de un mecanismo de transferencia, el cual consiste de una gran presión sobre la superficie del agua que sea superior a la presión del aire. Este mecanismo de transferencia, y en consecuencia, la evaporación es acelerada por la acción del viento.

Los métodos implementados para reducir las pérdidas por evaporación de la superficie del agua incluyen diferentes alternativas; cada una de ellas se adapta mejor a determinadas circunstancias. A continuación se mencionan algunas de ellas.

6.2.6.1. Reducción de la superficie de evaporación

La proporción superficie-área-volumen, puede reducirse eligiendo un sitio adecuado para la instalación de los reservorios, eliminando las áreas poco profundas que sirvan como represas y, en el caso de los reservorios pequeños, realizando excavaciones profundas. Al parecer, la eliminación de las represas superficiales evita que una gran cantidad de agua se evapore debido a que la disminución en la temperatura del agua está íntimamente relacionada con la profundidad.

Para construir un reservorio que elimine significativamente las pérdidas por evaporación, Cluff (1981) propone lo siguiente:

Dividir el reservorio en varios compartimentos (A, B y C). El compartimento A se encuentra debajo del nivel de la corriente y generalmente es poco profundo; los compartimentos B y C tienen una superficie menor, pero son mucho más profundos. El sistema funciona así; cuando una corriente se produce durante la estación de lluvias, el agua es almacenada en los tres compartimentos, los cuales quedan llenos. En esta época, el agua que se necesite es sacada de reservorio A (que es el menos eficiente), al mismo tiempo, las pérdidas por evaporación e infiltración de los reservorios B y C equivales al agua restante en A. Mediante una bomba, el agua restante de A es pasada a B y C (Fig. 42). Con ello se eliminan las pérdidas por evaporación e infiltración en A. Posteriormente, el agua requerida es sacada de B, pero también sufre pérdidas por evaporación e infiltración. De igual manera, en C

también se pierde agua por los mismos conceptos, pero estas pérdidas equivalen al agua restante en B. Con la ayuda de una bomba se pasa esta agua a C a fin de evitar que haya pérdidas por evaporación e infiltración en B. En este momento, C se encuentra totalmente lleno, mientras que A y B están totalmente vacíos. En ocasiones se requiere un vertedero en el compartimento A para proteger al sistema de corrientes muy grandes o violentas. Todos los diques deben de construirse de manera que coincidan con el nivel del vertedero.

Se pueden construir gráficas que permitan observar la bondad de esta técnica. Para ello se debe asumir que los reservorios solo son abastecidos por el agua de los escurrimientos, un grado anual de evaporación y un uso consuntivo mensual constante, de manera que al final del año se use toda el agua del reservorio (este valor puede determinarse mediante prueba y error). A este parámetro se le llame el máximo uso consuntivo mensual constante y es igual a cero para los reservorios de un solo compartimento. Cuando la profundidad del reservorio equivale a la pérdida anual por evaporación, será imposible el suministro permanente de agua, ya que toda ella puede perderse por evaporación.

Para reducir los costos, en esta técnica se pueden utilizar los reservorios existentes. Desde que se emplean bombas, en los terrenos planos pueden construirse a mayor profundidad los compartimentos que reciben agua del compartimento que es abastecido por la corriente. En los últimos años se han puesto a la venta bombas portátiles de baja presión y gran capacidad, que funcionan conectándose a la toma de fuerza de un tractor o con un motor propio. Una misma bomba puede emplearse en varios reservorios pequeños. Si no existe un tractor disponible, un vehículo puede ser adaptado con una toma de fuerza y usarse, tanto para transportar como proporcionar energía a la bomba. En algunos lugares (por ejemplo, Arizona), este tipo de bombas puede rentarse cuando solo se necesitan tres o cuatro veces al año (Cluff, 1981).

Cuando la pendiente del terreno es mayor al 3 ó 4% puede reciclarse el agua de los reservorios por gravedad. En este caso, los compartimentos se construyen a una

distancia suficiente que permita que cada uno de ellos pueda drenarse por completo mediante la utilización de conductos subterráneos.

6.2.6.2. Métodos de reflexión

Las barreras reflectivas incluyen tratamientos que reducen la energía que llega a la superficie del agua, como son la adición de colorantes en el agua, sombreado por materiales suspendidos y barreras reflectivas flotantes, tales como perlita, que pueden o no ser una barrera al vapor.

Las cubiertas suspendidas se elaboran con los materiales disponibles en la región, colocándose sobre la superficie del reservorio mediante alambres. En, Botswana, Sudáfrica central, existe un depósito cubierto con tallos de sorgo amarrados en manojos y colocados en alambres tensados. Otros materiales adecuados por su bajo costo y disponibilidad son las latas vacías de refrescos o cervezas. El hule butilo reforzado, suspendido en cables cubiertos con manguera plástica ha dado excelentes resultados (Jaquez, 1982).

La utilización de cubiertas hechas con materiales rígidos, ya sean metálicas o de concreto, suprimen de manera permanente las pérdidas por evaporación, pero implican un costo demasiado elevado, además de que para su instalación se requiere mano de obra especializada y herramienta apropiada (Jaquez, 1982).

6.2.6.3. Capas monomoleculares de alcoholes de cadena larga

Las películas superficiales formadas por alcoholes de cadena larga fueron muy estudiadas en las décadas de los 50's y 60's. Durante estos estudios se perfeccionó el uso del alcohol para reducir la evaporación y su uso se extendió por el desarrollo y presentación de muchas formulaciones físicas (Cluff, 1981).

La idea básica consiste en la formación de una película monomolecular de alcohol sobre la superficie del agua; el extremo hidrófilo de la molécula (constituido por grupos OH) se adhiere a la superficie del agua, mientras el extremo hidrófobo (grupos CH₃) queda en contacto directo con la atmósfera. Las moléculas de alcohol

quedan orientadas perpendicularmente con respecto a la superficie del agua (Velasco, 1991).

Entre las moléculas así orientadas no existe fuerza especial que las mantenga unidas; su continuidad se debe a la compresión, ésta es la razón por la que vientos con velocidades mayores de 13 km/h alteran la continuidad de la capa monomolecular. Por ello la utilización de alcoholes de cadena larga para disminuir la evaporación, tales como n-hexadecanol, n-octadecanol, n-eicosanol y n-docosanol, requieren de un emulsionante que aumente la coalescencia de sus moléculas y mantenga la continuidad de la capa agua-alcohol (Velasco, 1991).

Se ha encontrado que las combinaciones de cadenas en las que predomina el n-eicosanol y el n-docosanol, son más eficaces que otras con porcentajes mayores de n-hexadecanol y n-octadecanol (Velasco, 1991).

La National Academy of Sciences (2001) señala las siguientes ventajas de los alcoholes alifáticos de capa monomolecular:

- Se requieren solo en pequeñas cantidades (menos de 60g por ha de superficie de agua);
- No impiden intercambio de oxígeno entre el agua y el aire;
- No son sustancias tóxicas tanto para peces como para humanos.

Este método es más recomendable para grandes reservorios que para pequeños, debido a que el costo del agua almacenada, generalmente es inversamente proporcional a la capacidad del reservorio.

6.2.6.4. Aceites y ceras

Los lípidos se clasifican, según sus características físicas, en grasas, ceras y aceites. Son insolubles en agua y de menor densidad. Solo se ha probado experimentalmente; han sido usados aceites de algodón, soya, cártamo y ceras líquidas de jojoba (Velasco, 1991).

6.2.6.5. Cubiertas de parafina

Esta sustancia únicamente ha sido probada en forma experimental, sin embargo podría ser muy útil como reductor de evaporación en recipientes metálicos (Velasco, 1991).

Agregando bloques de parafina flotante en la superficie de los reservorios, al incidir sobre ellos la luz del sol se derriten y forman una película flexible y continua; el espesor de la película generalmente oscila entre 0.5 y 1.0 cm (Velasco, 1991).

La National Academy of Sciences (2001) señala que en una prueba realizada en Arizona, durante un Lapso de 4 años se logró reducir la evaporación en un 85% en un pequeño reservorio. Otra ventaja de este método es que cuando la película se rompe por efecto del enfriamiento del agua, la energía solar la vuelve a formar. Lo primero ocurre cuando las pérdidas por evaporación decrecen, pero cuando el grado de evaporación es mayor la película está nuevamente formada.

6.2.6.6. Cubiertas mecánicas

Para reservorios pequeños, las cubiertas hechas a base de materiales baratos suelen ser las más apropiadas. Dentro de los materiales disponibles se encuentran; láminas de polietileno (PE), planchas de concreto mezclado con agregados ligeros y láminas delgadas de poliestireno expandido (Figura 39).

Para evitar el sobrecalentamiento del agua (problema inherente a la supresión de la evaporación) en algunas investigaciones se han probado materiales flotantes hechos con sustancias aislantes o que reflejen la energía solar para evitar que incida directamente en la superficie del agua. Por ejemplo, láminas hechas con polistireno, material muy aislante y económico, de 2.5 cm de ancho recubiertas con asfalto y grava han dado buenos resultados unidas con abrazaderas para formar balsas de más de 160 m² (National Academy of Sciences, 2001).

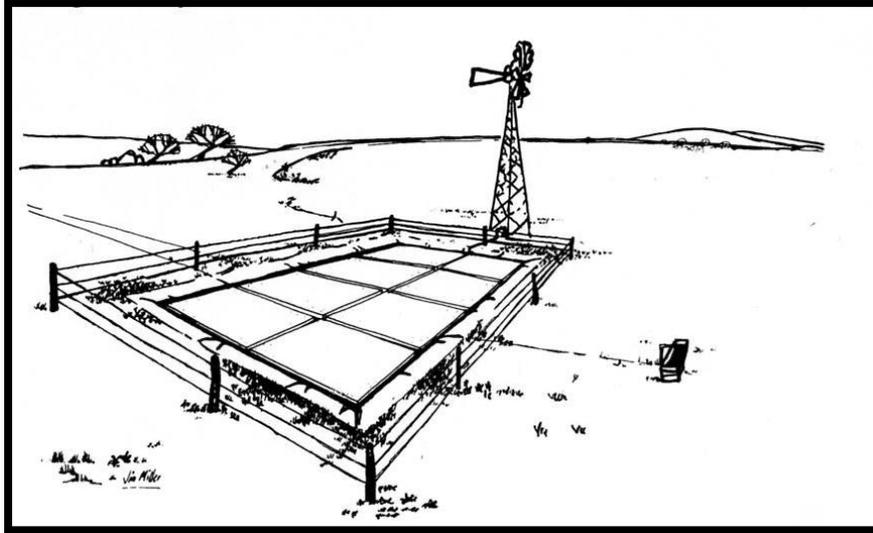


Figura 39. Capa de polistireno usada para reducir las pérdidas por evaporación.

Cluff (1977) citado por Cluff, (1981) probó láminas de polistireno impregnadas con parafina con el fin de evitar la fricción con el agua y hacerla impermeables. Esta técnica fue patentada; parece reducir los procesos de oxidación. Durante el primer verano de prueba no se presentó ningún problema. Sin embargo, durante el segundo, una tormenta de polvo ocurrió cuando la temperatura del aire excedía los 45° C la parafina de la superficie se fundió y quedó mezclada con el polvo oscuro que tenía en su superficie. Este polvo parece acelerar la degradación de la lámina. Las alternativas propuestas al respecto son:

- Usar una parafina con un punto de fusión más elevado;
- Usar un tratamiento superficial de parafina a alta temperatura;
- Usar concretos de agregados ligeros impregnados con parafina.

Sin embargo, los mejores métodos para reducir la evaporación son demasiado caros para usarlos con fines de una agricultura convencional, pero pueden combinarse adecuadamente con reservorios divididos en compartimentos.

6.2.6.7. Materiales granulares flotantes

La evaporación que se verifica sobre una superficie de agua cubierta con un material granular flotante, está fundamentalmente gobernada por la emisividad y reflectividad del material cubriente. El agua tiene una alta emisividad (cerca del 90%), pero muy bajo albedo (de 5 a 10%); así que los materiales flotantes de color blanco pueden utilizarse para suprimir la evaporación del agua libre, por tener alta emisividad y albedo, en este caso se han probado experimentalmente carbonato de calcio, poliestireno y perlita (Velasco, 1991).

6.2.6.8. Coberturas flotantes a base de gomas sintéticas

Las coberturas flotantes también permiten reducir parcialmente la evaporación. Se emplean para ello materiales de goma sintética de células cerradas, tipo espuma de goma de baja densidad, de 3 a 12 mm de espesor, y que es altamente resistente a las condiciones de intemperie.

Con esta goma sintética se cubre el 95% de la superficie del tanque. Como esta espuma de goma flota, sólo es necesario armar un círculo, algo más chico que el tanque, que también sea de un material que flote, para tenerla tensa. A la goma se le hacen algunos agujeros de 12mm de diámetro a 1m del centro, para permitir el desagote del agua de lluvia.

Una capa de 6mm de espesor y de un tamaño suficiente para cubrir un tanque de 10m de diámetro, puede pesar aproximadamente 50kg. Con este método se puede reducir la evaporación en un 75%.

6.2.6.9. Reservorios rellenos con arena

La evaporación puede controlarse rellorando los reservorios con arena y roca suelta. El agua es almacenada en los poros existentes entre las partículas. El nivel del agua se mantiene a 30 cm por debajo de la superficie para protegerla contra la evaporación. En una prueba realizada con dos reservorios pequeños, en Arizona,

se redujo la capacidad de almacenamiento de ellos a un 55%, pero las pérdidas por evaporación se evitaron en un 90%. Otro ejemplo práctico se localiza en Sudán, donde se construyó un tanque relleno con arena para almacenar el agua de lluvia colectada (National Academy of Sciences, 2001)

6.2.6.10. Placas suspendidas de material vegetativo

En el medio rural existen plantas que pueden utilizarse para la construcción de cuadros o placas, los cuales proveerán de sombra a almacenes de agua. Dentro de las plantas que pueden ser utilizadas para ello, de acuerdo a Velasco (1991), están las siguientes:

- Gobernadora (*Larrea tridentata*): de esta planta se utilizan únicamente los tallos secos.
- Sotol chino (*Dasyllirion texanum*): el follaje de esta planta se acomoda y compacta para la construcción de cuadros, debido a su longitud y forma aplanada.
- Cedro blanco (*Juniperus flaccida*): de éste árbol se utilizan los tallos. Se hacen placas de 1 cm de espesor.
- Sotol padillo (*Dasyllirion longissimum*): de esta planta se utilizan las hojas, las cuales son cilíndricas y tienen forma de vara.

6.3. *Ventajas y desventaja de las técnicas de colecta de agua de lluvia*

Algunas de las ventajas de estos métodos son:

- ❖ Sorprendentemente, la capacidad de carga animal de muchos pastizales de zonas áridas está más limitada por la falta de agua que por la falta de pastura. La colecta de agua de lluvia es una fuente extra de suministro. Mejorando los abrevaderos se puede incrementar el valor de dichos pastizales y crear la posibilidad de un uso más racional de los recursos naturales;

- ❖ Una vez instalados, el sistema no requiere de combustibles ni de otras fuentes de energía para proporcionar agua;
- ❖ Con la disponibilidad de nuevos materiales, se han reducido mucho los costos de construcción de colectores de agua de lluvia. Las técnicas más notables son los tratamientos químicos y las cubiertas al suelo (parafina, asfalto y capas de plástico cubiertas con grava); estas materiales protegen al suelo de la erosión. En lugares con una precipitación mayor a 300 mm son más recomendables los métodos de alteración del terreno, por ser más económicos y pueden proveer de agua para riego a un costo mucho menor;
- ❖ Los países áridos en desarrollo que producen y refinan el petróleo crudo tienen la posibilidad de utilizar asfalto en la construcción de sistemas colectores de agua de lluvia. Algunos derivados del petróleo, tales como el asfalto tienen escasa demanda y ofrecen buenas características para utilizarse en la construcción de estos sistemas.

Dentro de las limitaciones más notables están:

- ❖ La principal limitante de este sistema es de que dependen directamente de la lluvia. Sin una precipitación adecuada, el sistema puede fallar durante años. En localidades con menos de 80 mm de lluvia anual, los colectores de agua de lluvia nunca serán económicamente redituables;
- ❖ Para utilizar estos métodos en áreas inclinadas se debe tener cuidado con los efectos negativos que se puedan producir. El mal uso o manejo de los colectores, puede erosionar o desestabilizar al suelo y causar inundaciones locales. Se consideran colectores eficientes aquellos que necesitan pendientes pequeñas;
- ❖ En la actualidad es posible construir sistemas colectores de agua en superficies pequeñas. Sin embargo, hacen falta datos sobre la intensidad y variabilidad de la lluvia en muchas zonas áridas;
- ❖ Los tratamientos al suelo tiene una vida útil corta, por lo que deben ser removidos periódicamente. También se les debe dar mantenimiento constante para evitar

que sufran daños por la inestabilidad del suelo, la oxidación y el desarrollo de malas hierbas;

- ❖ Ninguno de estos métodos ha tenido un análisis económico durante un largo periodo de tiempo. Es necesario construir captadores de agua de lluvia en diferentes lugares, en base a los datos obtenidos con las diferentes variables económicas y con métodos que se adapten a las condiciones locales. Se requiere de datos para cada país en particular, ya que la mayoría de los métodos fueron creados en países como Israel, Australia y Estados Unidos. Con una poca de investigación es posible adaptarlos a las necesidades, economía y materiales disponibles en países en desarrollo; ellos representan una buena e inmediata solución al problema del suministro de agua en las zonas áridas.
- ❖ Por lo tanto, el mayor esfuerzo en la investigación debe encaminarse a disminuir los costos de instalación de los colectores y de encontrar tratamientos mejor adaptados a una mayor variedad de suelo y situaciones específicas. La industria pone a nuestra disposición nuevos materiales que deben de probarse y evaluarse para, de este modo, saber si pueden utilizarse en la construcción de estos sistemas.

7. TÉCNICAS NO CONVENCIONALES EMPLEADAS PARA LA COSECHA DE AGUA

7.1. *Lluvia artificial o siembra de nubes*

Orson y Vaughn (1985) describen que para hablar de la lluvia artificial es preciso saber cómo ocurre la lluvia naturalmente. Así, mediante un proceso conocido como nucleación, se forman, alrededor de materias extrañas (tales como partículas de sal, de polvo u otras sustancias que se encuentran en suspensión en la atmósfera), cristales de hielo que posteriormente se combinan entre sí, aumentando su tamaño hasta que caen, ya sea en forma de nieve o de lluvia.

La lluvia artificial o siembra de nubes consiste ante todo en introducir en la atmósfera partículas con el fin de iniciar la formación de gotas. El yoduro de plata y la nieve carbónica son más activos que las partículas en suspensión en la atmósfera, por lo que ambos se utilizan en profusión. La nieve carbónica tiene el inconveniente de que ha de ser introducida en las propias nubes por medio de aeroplanos casi siempre, y que se disipa mientras cae en el aire.

Se ha confirmado que en condiciones adecuadas la siembra de nubes obtiene buenos resultados, sin embargo habría que valorar el coste económico de esta práctica y profundizar conocimientos en el proceso de las tormentas para mejores resultados.

7.2. *Depuración de aguas salinas*

El agua del mar, de los lagos salobres y el agua salobre subterránea son grandes fuentes de agua prácticamente no explotadas por las tierras áridas.

Los métodos más avanzados para convertir el agua en las cantidades necesarias para el riego se basan en; i) destilación para la conversión del agua salobre (3,000 a 4,000 ppm. TSS) en agua que pueda usarse para riego (500 ppm. TSS), (ONU, 1964).

El uso de las plantas desalinizadoras crece rápidamente en aquellos países en los que prácticamente se ha agotado el potencial de su suministro convencional de agua.

No obstante, el inconveniente para la práctica de separación de sales del agua es la dificultad para encontrar los métodos más económicos y rentables: Para eliminar la sal de 3.78 m³ de agua del mar es necesaria, al menos, una energía de 2.8 kW/h (3.8 CV/h). Si suponemos que un kW/h cuesta un céntimo de dólar, el coste de la eliminación de sal de 3.78 m³ de agua del mar es de 2.8 céntimos de dólar, o lo que es lo mismo, unos 0.75 céntimos por metro cúbico (Orson y Vaughn, 1985).

El agua no necesita ser pura para todas sus aplicaciones. Cuando se aplican las técnicas de riego adecuadas se puede utilizar de un modo permanente agua que contenga un elevado grado de salinidad.

7.3. Destilación solar

La destilación solar se basa en el principio de obtención de agua a través de la implementación de energía luminosa, la cual provoca la liberación (evaporación) del líquido del medio donde se encuentre presente; ya sea del suelo, tejidos vegetales, de aguas residuales y de aguas salobres, separando los residuos orgánicos y electrolitos de estos dos últimos (Velasco, 1991).

Esta técnica es empleada básicamente para mejorar la calidad del agua en zonas donde este recurso es escaso y las fuentes de agua son insalubres o salinas, generalmente se usa como un método alternativo de sobrevivencia.

7.4. Cosecha de agua de niebla

La obtención de agua a partir de la humedad del aire es una técnica sobre la que existen antecedentes de varios años atrás. Ejemplo de ello citado por Dinkins (1969), es el cultivo de la vid en la isla de Lanzarote, Canarias, en donde cada planta se instala al fondo de un tazón cubierto con gravilla volcánica; en las tardes y noches, por efecto del enfriamiento debido a radiación terrestre, la superficie

alcanza la temperatura de rocío, la humedad condensa sobre la tierra y escurre a las raíces de la vid (Román, 1999).

También, en países como Chile, Perú, Sudáfrica, Nepal o Croacia se realizan desde años atrás estudios sobre la captación de niebla, concluyéndose que en zonas con ciertas características, la niebla puede ser una importante fuente de agua (Estrela, Corell y Valiente, 2008).

La niebla está conformada por diminutas gotas de agua suspendidas en la atmósfera, que reducen en mayor o menor medida la visibilidad (Estrela *et al.*, 2008). Para tener una mejor comprensión de este método se explica a continuación la naturaleza de las neblinas dinámicas diferenciadas estas en tres tipos, mismas que son aprovechadas por este método, especialmente las camanchacas:

- Niebla radiativa. Es una masa de aire sobresaturada de agua que tiene muy baja velocidad de desplazamiento. Se origina en noches con cielo claro y con aire muy quieto: la tierra pierde energía por radiación terrestre enfriando a su vez, por conducción, las masas de aire en su proximidad; cuando la temperatura del aire cae por debajo del punto de rocío, la humedad presente en él condensa formando finísimas gotas de agua, este fenómeno se puede extender hacia capas superiores, finalmente se disipa cuando las masas absorben suficiente radiación solar y su temperatura supera la de rocío (Román, 1999).
- Niebla advectiva. Se define de la misma forma que la anterior, sin embargo es de origen diferente. Son masas de aire cercanas a la saturación que, por efecto del viento, son desplazadas a zonas más frías: al ponerse en contacto con tierra o agua fría, se alcanza la saturación y se forma la neblina; este fenómeno es frecuente en las costas en ciertas épocas del año (Román, 1999).
- Camanchaca. Nombre dado en Chile a un tipo de niebla costera, conocida también en Cataluña como “rufa”, es un tipo de neblina costera muy densa que tiene características dinámicas. A diferencia de los casos anteriores, se trata de condensación en altura que es desplazada hacia zonas costeras por

el viento. En la costa, frente a estas nubes generalmente existe un cordón montañoso que bloquea la penetración de las nubes hacia el continente. Esto hace que las zonas de montaña en contacto con las nubes permanezcan períodos largos cubiertas (Figura 40); se trata de nubes dinámicas, pues la brisa marina las empuja constantemente hacia la costa (Román, 1999).



Figura 40. Aspecto de la camanchaca en el Desierto Chileno⁹.

Este sistema de cosecha de agua se basa en los mecanismos de captación de agua de niebla de los árboles y otras especies vegetales; sólo que usando mallas plásticas, las cuales se colocan verticalmente sobre dos postes y se instalan estratégicamente en zonas de altas montañas (Corell, Estrela y Valiente, 2011).

La captación de agua se realiza a través de captadores pasivos de niebla, donde el proceso de recolección es simple: las gotas de agua suspendidas en el aire que forman la niebla son empujadas por el viento, chocando contra la superficie recolectora del captador (normalmente se usa malla plástica de sombreado de los invernaderos agrícolas) y a medida que crecen por el impacto de nuevas gotas, caen por gravedad deslizándose a través de los hilos de la malla; el agua se recoge por medio de un canalón situado en la parte inferior de la malla y es conducida a un depósito para su almacenamiento (Estrela *et al.*, 2008).

⁹ <http://www.mimeteo.com/blog/medioambiente/camanchaca/>

Corell *et al.* (2011) mencionan que en base a estudios previamente realizados, las mallas agrícolas más eficientes en la captura de agua de niebla son las de tipo **raschel** con un porcentaje de sombreado de 35 %, asegurando con ello que la niebla arrastrada por el viento atraviese la malla, quedándose las gotas adheridas a las mismas, este no sería el caso si la malla fuera demasiado tupida o altamente transpirable.

De acuerdo con Corell *et al.* (2011), existen dos tipos de captadores de niebla, párrafos abajo se describen según lo citado por dichos autores:

7.4.1. CAPTADORES PLANOS.

Estos captadores están formados por una malla plástica colocada verticalmente y sujeta por dos postes, tomando la forma de una pantalla (Figura 41). Para asegurar la eficiencia de este sistema, los paneles deben ser instalados perpendicularmente a la dirección de los vientos predominantes del lugar, por lo que se sugiere realizar estudios previos para determinar las direcciones de viento óptimas de captación. El tamaño del captador dependerá del volumen de agua que se quiera cosechar, no obstante comúnmente se instalan mallas a dos metros de altura con seis metros de ancho por cuatro de alto (24 m²). Existen diversos modelos de captadores planos en el mercado, diseñados para diversas intensidades del viento.



Figura 41. Esquema de un captador de niebla plano (Estrela *et al.*, 2008).

7.4.2. CAPTADORES CILÍNDRICOS

Generalmente son captadores más pequeños que los planos y consisten en un cilindro hecho con malla plástica (o hilos de nylon) dispuesto verticalmente (Figura 42). La ventaja de estos captadores es que su colocación en campo no requiere estudios previos, ya que son igual de eficientes en la captura de niebla para todas las direcciones de viento. Estos captadores suelen ser pequeños (0.5 m de alto por 0.3 m de ancho) y es habitual su colocación previa a los captadores planos, a modo de cuantificar el potencial de recolección de agua de niebla de un determinado punto.

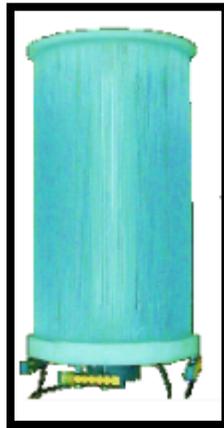


Figura 42. Ejemplo de un captador de niebla cilíndrico (Corell *et al.*, 2011).

7.4.3. EJEMPLO DE SU APLICACIÓN EN EL MUNDO

Actualmente se llevan a cabo proyectos de cosecha de agua mediante esta técnica, ya sea con fines de investigación o para aprovechamiento. Por citar algunos ejemplos:

- ⇒ En el litoral mediterráneo de la península ibérica se lleva a cabo un proyecto de investigación desde el año 2003 para determinar el potencial de recolección de agua de niebla, mediante el uso de mallas tipo raschel adecuadamente instaladas en relación a la dirección del viento. El

rendimiento observado va desde los 0.5 L/m²/día hasta los 61 L/m²/día, dependiendo esto de las condiciones atmosféricas (Corell *et al.*, 2011).

- ⇒ Un caso chileno se encuentra en el poblado de Chungungo, al norte de Chile, ahí existe una superficie de captación de 3,528 m² que produce aproximadamente 10,580 l, es decir 3 L/m² (Bautista, Tovar, Palacios y Mancillas, 2011).
- ⇒ Otro ejemplo chileno lo constituyen los trabajos realizados en Chile por la Universidad Católica del Norte y los hechos por la CONAF en Tofo, donde se obtuvieron rendimientos entre 2 y 6 L/m²/día (Román, 1999).
- ⇒ También se habla de un proyecto considerado como el más grande, que se desarrolla en Tojquia, Guatemala, donde existen instalados 60 captadores de malla que en conjunto suman 1,440 m² de superficie interceptora (Corell *et al.*, 2011).
- ⇒ A las afueras de Lima, Perú, se desarrolla también este tipo de proyecto, siendo considerada esta ciudad como la segunda más grande situada en el desierto; el desarrollo de estos métodos ha sido posible gracias a la ayuda de organizaciones altruistas como Alimón (Alemania), asimismo otra organización llamada FogQuest (Canadá) ha instalado mallas colectoras en Chile, Namibia, Omán y Guatemala (Vince, 2010). Con estos captadores se ha cosechado agua únicamente para satisfacer las necesidades básicas de los pobladores.
- ⇒ Finalmente, en nuestro país México, la Comisión Estatal del Agua (CEA) de Querétaro y la Cámara Nacional de la Industria de la Transformación (CANACINTRA), actualmente ejecutan en conjunto un proyecto piloto de captación de agua de niebla en San Joaquín, Querétaro, con el fin de identificar la factibilidad de su empleo así como el diseño óptimo para su aplicación en diferentes municipios (CANACINTRA, 2013).

Este método se puede adecuar para lograr el aprovechamiento del agua en uso doméstico, agrícola o comercial; lo que permitiría ampliar sus aplicaciones de

acuerdo a las necesidades: Hasta ahora, cerca de 22 países utilizan la captación artificial de agua de niebla, principalmente en América del Sur, como Chile y Perú (CANACINTRA, 2013).

7.5. *Humedad atmosférica*

Beysens y Milimouk (2000) explican que la atmósfera contiene 12,900 km³ de agua dulce, de la cual 98 % es vapor de agua y 2 % agua condensada (nubes); por lo que el agua atmosférica ha sido considerada como una fuente alternativa de agua potable en las zonas áridas y semiáridas, como lo menciona Cereceda *et al.* (2000), que puede complementarse con las fuentes tradicionales de agua, como se ha estado haciendo en diversas partes del mundo con la niebla (Bautista, *et al.*, 2011).

En este sentido, a partir del mecanismo de adaptación del escarabajo del Desierto de Namib, que utiliza el agua condensada en su cuerpo proveniente de la humedad atmosférica, se han desarrollado varios prototipos de condensadores de humedad; no obstante en muchos casos el costo de obtención del agua suele ser elevado, debido a sus altos gastos de energía, aunque puede llegar a ser una alternativa factible (Aguado, 2010).

Bautista *et al.* (2011), utilizaron un prototipo llamado Higoimán CP-HI-03 para evaluar la eficiencia del mismo en la obtención de agua atmosférica, el costo y los intervalos de colecta, en la zona del Distrito Federal. Este prototipo trabaja con circuito cerrado herméticamente y consta de: un compresor, filtro, tubo capilar, condensador, serpentín o evaporador, termostato, dos termómetros y gas freón (R-12). Dentro de los resultados obtenidos mencionan que se recolectaron 1.98 L de agua por cada 15 h, con un costo de \$1.80 por L de agua.

Asimismo, debido a que esta técnica ha cobrado mayor interés, empresas dedicadas a la comercialización del agua ha desarrollado diversos prototipos comerciales de condensadores, los hay desde los clásicos con pantallas y los activados mediante energía eólica (Aguado, 2010; Conciencia Sustentable, 2013).

7.6. Algunas técnicas sobrevaloradas y mal manejadas

7.6.1. AGUA FREÁTICA

Los depósitos de agua subterránea son la fuente de agua de los pozos y los manantiales, así como del flujo de los arroyos durante los periodos sin lluvia. El volumen del agua subterránea almacenada en las profundidades menores de 800 m, según se calcula generalmente, es de 3,000 veces la contenida en todos los ríos.

En general, los depósitos de agua subterránea se hallan en equilibrio dinámico con la precipitación, evaporación y drenaje hacia el mar. Sin embargo, como los pozos que pertenecen a diferentes dueños perforan el mismo manto acuífero, la sobreexplotación ocurre con frecuencia, dando como resultado un descenso en el nivel freático y en los casos más extremos, un daño irreversible al acuífero como resultado de la introducción de aguas saladas o el hundimiento de la tierra.

Por razones de tipo económico, las aguas subterráneas no se utilizan hasta que se ha hecho uso, dentro de un cierto intervalo de rentabilidad, de las superficiales.

Se bombea agua subterránea en todas partes del mundo como uno de los medios más importantes para obtener agua de riego. Uno de los métodos de drenaje consiste, por otra parte, en hacer descender, por medio de un bombeo intensivo, la capa freática del terreno. Por el contrario, en otras zonas el nivel freático ha descendido tanto a causa del bombeo para el riego, que ha sido preciso ahondar los pozos, incrementando la altura de elevación y encareciendo proporcionalmente el agua así obtenida.

7.6.1.1. Recarga de depósitos de agua freática

Las épocas críticas de escasez de agua subterránea debidas a las limitaciones de recarga natural, la baja capacidad de almacenamiento y la utilización excesiva, han estimulado los esfuerzos encaminados al llenado de embalses de agua subterránea con la superficial.

El encharcamiento sistemático de extensiones de terreno, tanto si vierten como si drenan al interior de depósitos subterráneos, es un método de reconocido valor para

el almacenamiento de agua. Lo que se hace en la práctica es extender el agua sobre la superficie del terreno para acelerar la filtración en el suelo y la percolación hasta el agua freática.

La filtración aumenta con el empleo de materia orgánica y la población de praderas que acondicionan el terreno para periodos prolongados de inmersión.

Otro método menos empleado de recarga utiliza galerías verticales, pozos, zanjas y perforaciones para permitir que el agua llegue a la zona de grava y al estrato de materiales rocosos.

7.6.1.2. Nivel de rentabilidad de los depósitos de agua subterránea

En los primeros tiempos, la cantidad de agua subterránea extraídas estaba determinada por los costes y las necesidades. No obstante, el descenso considerable de la capa freática o de la presión alarmó a los técnicos y se planteó el problema de definir el “rendimiento de seguridad”. Las demandas de nuevos usuarios han motivado que muchos tribunales restrinjan su utilización para que se mantenga el nivel (o la presión) del acuífero (Orson y Vaughn, 1985).

En algunas zonas en las que las posibilidades de recarga son limitadas, se admite como de gran utilidad el empleo de técnicas mineras para su puesta en práctica. El nivel rentable implica un equilibrio en el que no es posible el bombeo excesivo y antieconómico ni la deterioración de la calidad del agua.

El descenso excesivo del nivel del agua freática exige elevaciones muy grandes que, a veces, implican costos prohibitivos. La extensión de las elevaciones para el riego a partir de los recursos de aguas subterráneas debe determinarse a base de investigaciones largas sobre la recarga anual de los manantiales (Orson y Vaughn, 1985).

7.6.2. AGUAS RESIDUALES

La creciente demanda de agua en la región árida hace que sea necesaria la utilización y a veces reutilización repetida, de los flujos de retorno. Antes de que sea posible la reutilización, puede ser esencial hacer un tratamiento para mejorar la calidad. Las técnicas de mejoramiento varían de acuerdo con la naturaleza de la contaminación y el propósito para el cual ha de utilizarse el agua.

Las aguas negras no tratadas se han utilizado tradicionalmente para riego sin ninguna restricción. No obstante, las aguas negras parcialmente tratadas pueden ser peligrosas para la salud. Los procesos de tratamiento biológico eliminan una parte importante de materia orgánica; pueden destruirse muchos organismos patógenos, haciendo útil el agua para ciertas actividades como el riego, no obstante puede seguir significando un riesgo latente el consumo directo de esta agua.

El uso de las aguas tratadas para recargar el agua subterránea, en vez de reutilizarlas inmediatamente, constituye un factor considerable de seguridad, debido a que se reduce el número de microorganismos y el líquido se diluye más.

8. CONSERVACIÓN DE AGUA DE LLUVIA IN SITU

Un método de colecta y almacenamiento de agua de lluvia que resulte adecuado para un determinado lugar y condiciones ambientales, debe de complementarse con un método o sistema de conservación del agua, a fin de lograr un máximo aprovechamiento. En muchas ocasiones no se ha estimado el volumen de agua que se pierde, razón por la cual no se ha brindado la debida importancia. A continuación se presentan algunos de los métodos desarrollados a fin de reducir y/o evitar las pérdidas de agua captada y almacenada en la zona de aprovechamiento.

8.1. Reducción de la evaporación producida en la superficie del suelo

A través de la evaporación producida en la superficie del suelo, se pierden grandes cantidades de agua. Esto es particularmente importante en las zonas áridas, regiones donde la baja humedad relativa del aire favorece el incremento de dichas pérdidas. Aproximadamente de un cuarto a un medio de agua gastada por un cultivo se pierde por efectos de la evaporación en la superficie del suelo. La conservación de la humedad del suelo en la zona radicular de las plantas puede contribuir a lograr una mayor productividad sobre todo si dicha humedad se conserva durante el periodo más crítico de desarrollo del cultivo. En algunas regiones áridas, el reducir la evaporación del suelo representa una alternativa más viable que el establecimiento de obras de gran magnitud para el abastecimiento del agua. Dentro de los métodos desarrollados al respecto se tienen los siguientes:

8.1.1. RESIDUOS VEGETALES

El sembrar directamente en los surcos utilizados en el ciclo anterior es una buena medida para reducir las pérdidas por infiltración, ya que los residuos vegetales y el terreno no alterado forman una excelente barreta para conservar la humedad del suelo; esta barrera se rompe después de las prácticas de labranza. A este método se le conoce como “mínima labranza” o “labranza cero”; su principal inconveniente es la incidencia de malezas, pero se puede resolver mediante el uso de prácticas

manuales, pero nunca con métodos que alteren la superficie del suelo. En ocasiones, la superficie del suelo se compacta lo suficiente como para hacer más lenta la infiltración del agua y lograr una adecuada humectación de la zona radicular.

Los residuos vegetales como la paja y los restos de algodón, esparcidos sobre la superficie también contribuyen a reducir la cantidad de agua que se pierde por evaporación. Esta práctica es más efectiva cuando los residuos orgánicos cubren más de un 90% del terreno. En caso de utilizar paja, se requieren cerca de 1.5 t/ha; cuando se emplean residuos de algodón se necesita una cantidad aproximada de 11 t/ha. Se debe tener en cuenta que la mayor reducción de la evaporación ocurre en la primera capa de 5 mm de anchura (National Academy of Science, 2001).

8.1.2. CUBIERTAS DE ESTIÉRCOL Y GRAVA

La infiltración del agua en el suelo, así como la conservación de la humedad en él se mejoran notablemente con una capa de estiércol de 5 a 10 mm de ancho. Esta capa también protege el suelo contra la erosión hídrica y eólica; además forman una capa aislante que regula la temperatura del suelo, manteniéndolo frío cuando la temperatura del ambiente es cálida y caliente cuando el ambiente es frío (por ejemplo, en invierno); esto puede manifestarse en un mejor desarrollo de las plantas.

El principal inconveniente de este método es su alto costo, la necesidad de depositar periódicamente grava y la interferencia en la mecanización de las labores agrícolas (Myers, 1971).

8.1.3. CUBIERTAS DE PLÁSTICO Y PAPEL

Actualmente son muy utilizadas las cubiertas de papel y polietileno plástico para el control de malezas, incrementar la temperatura del suelo y acelerar la germinación y desarrollo de las plantas. En un experimento se cubrió el suelo con una película plástica ocasionando aumentar casi al doble el agua transpirada y evaporada por un cultivo de maíz, indicando con ello que más de la mitad del agua empleada en su riego se pierde por evaporación desde el suelo (Doss *et al.*, 1970).

Esta técnica también mejora la calidad de algunos frutos, ya que mantiene en buenas condiciones a los frutos que caen impidiendo que estén en contacto directo con la superficie del suelo. Mediante pequeñas perforaciones es posible obtener un adecuado grado de infiltración de agua de lluvia dentro del suelo. Los principales inconvenientes de las películas plásticas son su alto costo, que pueden ser difíciles de instalar y remover, y que no siempre tienden a favorecer el desarrollo de los cultivos (Myers, 1971).

8.1.4. CUBIERTAS DE LÁTEX, ASFALTO O PETRÓLEO

Cubiertas hechas con látex, asfalto o petróleo son muy usadas para el establecimiento de vegetación mediante el uso de trampas de agua en las dunas de arena. Algunos de los países donde se ha utilizado esta técnica son Australia, Libia y la India. Reteniendo el calor absorbido durante el día, estas cubiertas pueden conservar el suelo caliente aún durante las noches frías, con lo cual se incrementa el porcentaje de sobrevivencia de la plantación ya que las raíces no tienen que soportar grandes variaciones de temperatura (National Academy of Sciences, 2001).

Además de los materiales antes señalados, se han probado silicones, óxidos de polietileno, polisacáridos de mezcla rápida, alcoholes ácidos y sustancias químicas aniónicas, catiónicas y noiónicas, aunque sin mucho éxito. Desafortunadamente la implementación de esta técnica utilizando látex, asfalto o petróleo implica un alto costo, por lo que solo se utilizan en cultivos altamente redituables o cuando reporten significativos beneficios sociales (como la estabilización de las dunas de arena) o cuando se pretenda retener o corregir los efectos de la erosión. La National Academy of Sciences (2001) señala que los costos están en función de:

- La disponibilidad de materia prima;
- La topografía del lugar;
- La necesidad de fertilización y las labores de preparación del terreno que sean necesarias;
- La disponibilidad de maquinaria y personal;

- El tipo de vegetación que se pretende establecer.

El asfalto es un residuo barato del petróleo que se puede emplear para estos casos en dos formas:

- a. Después del nivelado y emparejado el contrapiso se riega con 1.5 a 2.5 de asfalto por metro cuadrado calentado a 60°C. Luego de secada esta aplicación se repite nuevamente con la misma concentración, aplicándose a continuación una delgada capa de arena de 4 kg/m², la que debe apisonarse con un rodillo pesado.
- b. Otro método es esparcir asfalto disuelto en un solvente, como ser nafta. A medida que se infiltra la solución, el asfalto se deposita y fragua con la tierra, formando un pavimento poroso y razonablemente sólido.

Otra manera de conservar el agua consiste en regar únicamente la zona radicular de las plantas evitando que el suelo tenga una humedad que pueda perder fácilmente en los días secos. El inconveniente de esta práctica es que es complicada y cara, aunque existen algunas variantes como el empleo de cubiertas. La mayoría de estas técnicas sólo se aplican en la producción de cultivos muy redituables. Sin embargo, la producción de tales cultivos es una de las mejores alternativas para las zonas áridas, dada la limitada cantidad de agua con que generalmente se dispone (Myers, 1971).

8.2. Reducción de las pérdidas por transpiración

Sólo el 1% del agua absorbida por las raíces se incorpora a las células de las plantas; el otro 99% se mueve a través de la planta y pasa a la atmósfera en forma de vapor. Este proceso llamado transpiración difiere de la evaporación en que se lleva a cabo en los tejidos vivos y está influenciada por la fisiología de las plantas. Una hectárea cubierta con vegetación puede llegar a transpirar cerca de 94,000 litros por día.

Para reducir las pérdidas por transpiración, la National Academy of Sciences (2001) recomienda las siguientes medidas:

- i. Eliminación de las plantas freatofitas que tengan altos porcentajes de evaporación, como el mezquite y el tamarix. Se estima que en el Oeste semiárido de los Estados Unidos, las plantas freatofitas cubren 6 millones de ha, causando pérdidas por transpiración superiores a los 25 millones de m³ por año.
- ii. Utilizar especies o variedades de plantas que transpiren en menor grado.
- iii. Cubrir los cultivos con una estructura, a fin de reciclar el agua transpirada y lograr un aumento en la humedad relativa para retardar los procesos de transpiración;
- iv. Reducir el aire que se mueve sobre los cultivos, por medio de cortinas rompevientos;
- v. Eliminación de las hojas improductivas, ya sea manualmente o con la ayuda de defoliadores.
- vi. La utilización de antitranspirantes químicos.

En relación a este último punto, existen diferentes métodos para reducir la transpiración artificialmente. Los más comunes son:

- Incremento en los niveles de reflexión de las hojas mediante la aplicación de sprays químicos, a fin de reducir las radiaciones infrarrojas que llegan a ellas;
- Aplicación de sprays que incrementan la resistencia de la planta a la difusión del vapor de agua.

Los productos químicos utilizados para reducir pérdidas por transpiración se llaman antitranspirantes, de los cuales se habla a continuación.

8.2.1. ANTITRANSPIRANTES

Los antitranspirantes han impactado mucho en años recientes como un medio para reducir las pérdidas de agua de las plantas por las hojas, esto se hace mediante la reducción del tamaño o número de aberturas estomatales y así disminuir el porcentaje de difusión por evaporación. No obstante es necesario un suministro de CO₂ por difusión a través de las cavidades estomáticas para que ocurra la fotosíntesis y una reducción en las aberturas resulta una restricción en esta. Es así

que para el uso de antitranspirantes debe realizarse un balance favorable entre la pérdida de humedad por las hojas y la restricción de la fotosíntesis.

Los antitranspirantes, de acuerdo a su efecto en la planta, se dividen en:

a) Compuestos que forman películas

Sus efectos son puramente mecánicos, ya que forman una barrera sobre la superficie foliar que reduce las pérdidas de vapor de agua. Las sustancias que se han probado son alcohol cetil, silicones, parafina, látex y plásticos. Las partículas hechas a base de emulsiones plásticas muestran cierto grado de selectividad, ya que son más permeables al dióxido de carbono y al oxígeno que al vapor de agua. Otras ventajas de estos materiales son:

- No son tóxicos para plantas y animales;
- Son altamente permeables a las longitudes de luz que sirven para promover la fotosíntesis;
- Tienen la suficiente flexibilidad para permitir los libres movimientos y expansión de las hojas;
- Son resistentes a los efectos de la luz solar, al ataque de los microorganismos y rupturas físicas;
- Son económicamente rentables.

Las películas antitranspirantes comúnmente disponibles reducen la transpiración durante la fotosíntesis por alrededor de 20-80% en 24 horas de tratamiento, y el efecto disminuye con el tiempo.

La efectividad de un antitranspirante está también determinado por factores de la planta; la distribución estomatal de las hojas es un factor importante.

b) Inhibidores metabólicos.

Afectan la superficie de transpiración y cierran los estomas para evitar las pérdidas de agua. La apertura y cierre de estomas está regulada por dos células guardianes altamente especializadas que determinan el grado de apertura. Los compuestos metabólicos se clasifican en dos grupos, de acuerdo a su modo de acción:

- I. Aquellos que cambian el potencial osmótico de las células guardianes, afectando su turgencia. En este grupo tenemos:

Hidrosulfatos: se les conoce como inhibidores metabólicos de las enzimas glicolico oxidasa, que participan activamente en el mecanismo de apertura y cierre de los estomas. Se sabe que el sulfato 8 hidroxiquimolina impide la apertura de los estomas de las hojas de tabaco bajo condiciones favorables de apertura.

Atrazine y Diuron (herbicidas): reducen la transpiración de la planta por cierre estomacal.

Daminozide: en un experimento realizado con tomate, se redujo su transpiración por inhibición de la apertura estomatal, incrementando las concentraciones de dióxido de carbono, el cual en altas concentraciones puede dañar a las células de la epidermis. No se recomienda como antitranspirante para uso práctico, ya que tiende a disminuir la eficiencia en el uso del agua.

Ácido abscísico (ABA): es una hormona vegetal que cierra los estomas, no es tóxica. Se observó que el cierre estomatal estaba precedido por altas concentraciones de este ácido, lo que confirmó su uso en el cierre de estoma a causa de un flujo de potasio hacia las células que lo rodean.

- II. En el segundo grupo tenemos a aquellos que modifican la permeabilidad de la membrana del plasma, de modo que su efecto produce el cierre de los estomas. Dentro de este grupo tenemos:

Acetatofenil mercurio: el mercurio que contiene se combina con la proteica y cambia la conducta permeabilizante de las células de la membrana plasmática. Debido a ello, hay una pérdida de turgencia que produce un flujo de agua y cierre de estomas. Se probó el efecto de este compuesto en la transpiración de tabaco y girasol, reduciendo las pérdidas de agua entre un 10 y 24%. Análisis de la resistencia al movimiento de agua, indicaron que al secarse el suelo, se produce

una significativa resistencia al movimiento de agua en el área de evaporación de las células del mesófilo.

Ácido alkenilsuccinico (ASA): es el más utilizado en las zonas áridas. Su propiedad más importante es que combina la membrana plasmática con hidrocarburos, modificando su permeabilidad. Se reporta que estos ácidos incrementan la permeabilidad de las células al agua por la incorporación de moléculas en la capa de lípidos. Es un inhibidor estomatal.

c) Reflectantes.

Su mecanismo es diferente al de aquellos materiales formadores de películas o a los que propician el cierre de los estomas. Los reflectantes incrementan la capacidad de la hoja para reflejar la energía luminosa (albedo), lo que reduce su temperatura. El uso de los reflectantes incrementa el albedo de los cultivos y disminuyen la cantidad de agua que se transpira. Por lo general, los cloroplastos superiores permanecen insaturados. Una reflexión secundaria de luz por el reflectante que cubre la hoja puede aumentar la penetración de luz dentro del dosel. Con ello es posible mejorar la distribución de la luz, lo que puede resultar en un incremento de la actividad fotosintética. Los dos principales compuestos que pertenecen a este grupo son el Caolín y el Celite.

Mientras que los antitranspirantes del tipo reflectantes reducen la temperatura de la hoja, los de tipo película y cierre de estomas tienden a incrementar la temperatura a través de reducir el enfriamiento evaporativo.

La National Academy of Sciences (2001) menciona las siguientes limitantes en los métodos para reducir la transpiración:

- La eliminación de plantas freatofitas es muy controvertida, especialmente en aquellas áreas donde puede causar la ruptura del equilibrio ecológico;
- Los estomas son accesos que permiten la toma de dióxido de carbono, compuesto indispensable para la fotosíntesis y, por consiguiente, para el desarrollo de las plantas. Una barrera química que impida el paso del agua

puede interferir con el desarrollo de las plantas si impide el paso del dióxido de carbono.

- Algunos antitranspirantes dañan a las células. Algunas sustancias químicas que cierran los estomas, son tóxicos para algunas plantas, aún utilizándose en concentraciones muy diluidas además de que son caros. Sus efectos sobre la vida animal no han sido suficientemente investigados.
- La transpiración normal sirve para disipar el exceso de calor; con el uso de antitranspirantes se puede causar un efecto negativo en el desarrollo de los cultivos, debido a que puede incrementar significativamente su temperatura interna.
- Estos antitranspirantes solo afectan la superficie de la hoja que existe en el momento en que son aplicados. El rápido desarrollo foliar puede hacerlos ineficientes.

9. TÉCNICAS PARA OPTIMIZAR EL USO DEL AGUA EN SISTEMAS DE CULTIVOS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

9.1. *Agricultura de secano*

Al referirnos al término secano, encontramos cierta controversia en la literatura existente al respecto. Algunos autores incluyen bajo este concepto, no solo a los sistemas agrícolas que dependen de la ocurrencia estacional de las lluvias (llamados en México “Agricultura de temporal deficiente”, en Estados Unidos “Dryland Farming” o “Rain-Fed Agriculture”), sino que también incluyen a los sistemas que se auxilian de los escurrimientos superficiales provocados por las mismas lluvias. Walton (1969, citado por Gallegos, 1985) considera que cuando el agua es suministrada a los terrenos de cultivo por los escurrimientos superficiales provocados por las lluvias estacionales y que escurren sobre laderas, abanicos aluviales o en los lechos de los ríos ocasionalmente llenados, la agricultura es una variante de la agricultura de secano bajo condiciones especiales del terrenos y se diferencian notablemente de la verdadera agricultura de riego, por los que se denomina “agricultura de inundación” o “agricultura de canales de inundación”. Una parte importante de estos sistemas son las acequias, aunque están pueden tener otras funciones, además de servir como canales de riego, como ya se indicó.

Es posible clasificar a los sistemas de producción agrícola de las zonas áridas, de acuerdo a la disponibilidad de agua en el tiempo, lugar y cantidad, en dos grandes grupos; los sistemas de riego y los sistemas de secano. Aunque los volúmenes totales de agua manejados en ambos sistemas pueden ser los mismos; en los sistemas de secano los escurrimientos y avenidas son ocasionales y varían en cuanto a los volúmenes de agua y ocurrencia, mientras que en los sistemas de riego se dispone de una fuente segura de suministro de agua.

9.1.1. ALGUNAS INNOVACIONES TECNOLÓGICAS

A continuación se describirán algunas técnicas que pueden ayudar a mejorar la eficiencia de los cultivos de secano, ellas son:

9.1.1.1. Surcado al contorno

Es una de las medidas sencillas y eficientes para promover la retención e infiltración de parte del agua de lluvia en la zona radicular de los cultivos. Con los surcos perpendiculares a la dirección de la pendiente del terreno, el agua no se infiltra de inmediato, sino que se acumula a lo largo de los surcos por la barrera que forman las plantas y los lomos de dichos surcos. SARH-COLPOS (1982) menciona que ésta práctica tiene los siguientes objetivos:

- Reducir la velocidad de los escurrimientos superficiales
- Aumentar la infiltración de agua en el suelo, incrementando la humedad disponible para las plantas.

Esta práctica es recomendable para terrenos con pendientes menores al 5%, no se recomienda para áreas con fuertes precipitaciones y donde los suelos sean arcillosos o descansen sobre un subsuelo impermeable, ya que los excesos de agua perjudican a los cultivos y pueden producir significativas pérdidas de suelo.

9.1.1.2. Terrazas de canal amplio de Zingg

Otra innovación es la utilización de terrazas de canal amplio o de Zingg. Para ello se construye un bancal en la parte baja de un área de captación, diseñándola para la utilización máxima del agua, lo que permite su utilización en áreas donde la precipitación es reducida y no existe la posibilidad de introducir riego. El ancho del canal varía con la pendiente del terreno, la profundidad permisible del corte, la anchura de la maquinaria, tipo de cultivo y la precipitación pluvial de la zona. Se recomienda que el bordo del canal tenga una altura suficiente que le permite almacenar el escurrimiento de una lluvia de 24 horas con un periodo de retorno de 5 años; estas terrazas se adaptan mejor en las zonas con pendientes mayores al 4% y con precipitaciones menores a los 500 mm anuales (SARH-COLPOS, 1982).

Con este tipo de terrazas se dispone un área de ancho uniforme y nivelado para el desarrollo de los cultivos. Las principales limitaciones para su implementación son la presencia de capas duras o infértiles que limiten la profundidad de corte por otra parte, cuando el suelo no es lo suficientemente permeable para retener la escorrentía máxima producida por una lluvia de 24 horas durante un periodo de 5 años, se deben de construir canales de desagüe hacia causes protegidos (SARH-COLPOS, 1982).

9.1.1.3. Fórmula utilizada para calcular la captación in situ del agua de lluvia para cierto cultivo dentro de la agricultura de secano

También se han producido innovaciones en cuanto a la captación in situ de agua de lluvia. Al respecto (SARH-COLPOS, 1982) describe de talladamente la metodología a utilizar en la determinación de la superficie requerida por cada cultivo para satisfacer (in situ) sus requerimientos de agua de lluvia; esta metodología puede sintetizarse de la siguiente manera:

- i. En base a los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas que cuenten con datos de precipitación o en su defecto tomando los datos de las cartas climáticas editadas por CETENAL, determinar si es necesaria la construcción de obras de captación, ello está en función de las necesidades mínimas de agua que requiere el cultivo a producir durante su desarrollo. Para esto se considera la distribución mensual promedio de la lluvia y los requerimientos de agua que tiene el cultivo en sus diferentes bases de desarrollo para transpirar y formar tejido celular, más el agua que se evapora en el suelo donde crece; en base a estos valores se elaboran cuadros y gráficas a fin de mostrar más claramente los excedentes y deficiencias de agua que tiene el cultivo en tiempo y espacio durante su desarrollo.
- ii. Conociendo las deficiencias de agua, es posible aplicar la fórmula de Anaya et al. Para determinar la superficie que debe destinarse a la captación y al almacenaje del escurrimiento.

Los sistemas de captación de agua de lluvia *in situ* se caracterizan porque:

- La captación se emplea únicamente en la producción de cultivos básicos, forrajeros, industriales, vegetación nativa y frutales;
- El área de escurrimiento (A_c) está formada por microcuencas que aportan cantidades adicionales de agua, pero sin conducirla a grandes distancias, ya que esta adyacente al área destinada para el almacenamiento (A_s);
- El área de almacenamiento es el mismo suelo donde se desarrollan las raíces del cultivo.

La fórmula de Anaya es la siguiente:

$$A_c = A_s + \frac{1}{C} \frac{(U_c - P \times A_s)}{P}$$

Donde:

Ac: Tamaño de la microcuenca;

As: Área de siembra que los agricultores tradicionalmente utilizan, según el cultivo;

C: Coeficiente de escurrimiento, porcentaje de agua de lluvia que no es interceptado, infiltrado ni evaporado y que escurre hacia el sitio de interés; se expresa en fracciones y varía de acuerdo a la precipitación, tipo de suelo, pendiente y acondicionamiento del área de escurrimiento;

Uc-P: Total de deficiencias mensuales de agua durante el ciclo vegetativo;

P: Total de lluvia que cae en el lapso de tiempo que dure el desarrollo de los cultivos.

Cuando el valor calculado del área de escurrimiento que se va a adicionar al área de siembra sea menor al 10% con respecto al A_s , no es recomendable considerarlo, sino que es más conveniente continuar con la distancia tradicional.

Esta fórmula se puede utilizar para cultivos en hileras, fajas o árboles frutales. En su utilización se debe tener cuidado con las unidades empleadas, a fin de no obtener resultados incongruentes.

En el caso de los frutales, el tamaño de la microcuenca se calcula considerando los requerimientos de agua que tendrá el frutal en su estado de madurez. Por ello, es posible que en los primeros años se tengan que realizar prácticas que eviten

problemas por los excesos de agua que reciban los árboles pequeños. De esta manera, se recomienda, durante el primer año, destinar solo la cuarta parte de la cuenca a captación y el resto utilizarlo con otro cultivo (maíz frijol, etc.). La superficie de captación se irá incrementando a medida que crezca el frutal, hasta utilizar toda la superficie de la cuenca para este fin. Lo anterior permite al agricultor obtener ingresos con los cultivos anuales, mientras el frutal es joven y no genera cosecha alguna.

9.1.1.4. Captación del agua de lluvia para riego suplementario

Otro método utilizado con éxito en la India, China, África y algunos otros países es la captación de agua de lluvia para riego suplementario (SARH-COLPOS, 1982). En él los excesos de agua se conducen por un pequeño desnivel de los surcos hacia un cauce protegido (generalmente revestido con pastos y hierbas) que los conduce hacia un tanque de almacenamiento o hacia fuera del campo de cultivo; la velocidad de la corriente se controla por la dirección y pendiente de los surcos; con ello se logra dar permanentemente una forma determinada a la superficie del terreno que lo protege contra la erosión que pueda producirse durante el transcurso del año, aun cuando pueda ocurrir una lluvia intensa durante la época seca y caliente, lapso en que no se cultiva el terreno (Krantz, 1981). El poder disponer de una pequeña cantidad de agua para riego suplementario en el momento preciso es de vital importancia para el desarrollo e muchos cultivos producidos en agricultura de secano. Krantz (1979, citado por Cluff, 1981) señala que en la India, con la adición de una lámina de riego de 5cm se logró duplicar la producción de varios cultivos, incluyendo maíz, por ello es importante valorar la potencialidad que tienen éstos sistemas dentro de la agricultura de secano.

9.1.2.LIMITACIONES

La agricultura de secano tiene varias limitaciones, la National Academy of Science (2001) señala las siguientes:

- La agricultura de escurrimiento requiere de suelos capaces de almacenar el agua. Se recomienda la utilización de plantas con raíces profundas, ya que tienen una mayor capacidad para absorber el agua y, por consiguiente, no dependen tanto de la frecuencia con que se presentan las lluvias;
- Este método se encarece por la necesidad de utilizar variedades de cultivos capaces de desarrollar en suelos que en ocasiones están húmedos y, otras veces, secos. Como en la agricultura convencional, también se deben controlar las plagas y enfermedades;
- Para la instrumentación de este sistema se requieren las siguiente condiciones ambientales:
 - Una precipitación mínima de 80mm si el periodo de lluvias coincide con la época fría del año; más de 80mm si las lluvias caen durante el verano, época en que aumenta la evapotranspiración;
 - Que los suelos formen una capa impermeable sobre su superficie;
 - Que el contenido de sales en los suelos agrícolas esté entre 2 y 3%
 - La profundidad del suelo en las áreas cultivadas debe ser de por lo menos de 1.5m
- La lámina de riego debe de adecuarse a las necesidades de los cultivos a fin de evitar la inundación de los terrenos agrícolas.

Otros factores que deben de tomarse en cuenta son:

- Las características de los suelos;
- Los requerimientos de agua que tienen los cultivos en sus diferentes etapas de desarrollo;
- Las pérdidas por evapotranspiración

Finalmente se requiere de mayor investigación, a fin de contar con la información necesaria para hacer una evaluación técnica-económica de este sistema en las diferentes regiones áridas del mundo (National Academy of Sciences, 2001).

9.2. Sistemas manuales para el establecimiento de plantaciones forestales

Estos sistemas se basan en proporcionar a las plántulas o arbolitos que se desea establecer, un área de captación que les proporcione agua suficiente para su desarrollo; esto se debe a que no es costeable establecer sistemas de riego dentro de las áreas forestales. Aunque la mayoría de estos sistemas no se desarrollaron pensando, precisamente, en utilizarlos dentro de las zonas áridas, ello no impide que para ciertas circunstancias, sean una buena alternativa. Para determinar el tipo de sistema a utilizar se debe de considerar los aspectos económicos, ambientales y sociales del lugar. En algunos casos, estos sistemas se han enfocado a la producción de frutales, obteniendo magníficos resultados. A continuación se mencionan los métodos más comunes utilizados:

9.2.1. APORCADO

Consiste en formar un promontorio cónico alrededor de la planta, auxiliándose de pala o azadón. Pimentel (1987) considera que esta práctica se justifica desde varios puntos de vista:

- Se capta mayor cantidad de agua, la cual no está en contacto directo con la planta;
- Se reduce la evaporación producida por la escarificación;
- Se reseca menos el suelo al reducirse el sobrecalentamiento de la capa superficial;
- No se queman las plantas por refracción.

9.2.2. SISTEMAS DE CEPAS

Consiste en abrir hoyos con dimensiones mínimas de 30x30x30 cm; las aperturas se realizan a las sustancias recomendadas para cada especie en particular, siguiendo las curvas a nivel, una vez colocada la planta, la cepa se rellena, comenzando con la tierra extraída de la superficie y terminando con la sacada a mayor profundidad, sin compactarse demasiado para permitir la aireación. Cuando sea posible, se debe añadir estiércol o composta a fin de favorecer la actividad microbiana, fuente adicional de nutrientes para la planta. Este sistema es funcional en terrenos con pendientes menores al 12%, con suelos profundos, arenosos o pedregosos (Figura 43). No se recomienda en terrenos “tepetatosos”, con suelos delgados subyaciendo un material duro o en lugares con escasa precipitación (SARH-COLPOS, 1982). Este método es la base de otros sistemas.

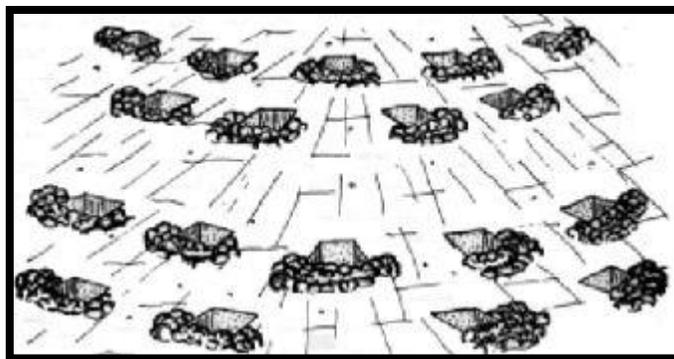


Figura 43. Cepas en distribución espacial a tres bolillo (INE, 2007)

9.2.3. SISTEMAS DE ZANJA Y BORDO

Consisten en construir zanjas y bordos de tierra perpendiculares a la pendiente del terreno. Tienen gran versatilidad, adaptándose fácilmente a los terrenos con pendientes entre el 5 y 40 % y al uso de maquinaria o mano de obra. Se recomienda establecer en los bordos algún tipo de vegetación que lo proteja contra los efectos de la erosión. Para lograr que este sistema tenga la capacidad para retener los escurrimientos máximos se deben de seguir los siguientes pasos (SARH-COLPOS, 1982):

- Calcular la pendiente media del terreno;

- Calcular el espaciamiento (E);
- Obtener la lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 5 años;
- Obtener el valor del coeficiente de escurrimiento (C).

La capacidad de almacenamiento del bordo se calcula con la fórmula:

$$A = E \times C \times L \times 10$$

Donde: A: capacidad de almacenamiento (l/m)

E: espaciamiento entre bordos (m)

C: coeficiente de escurrimiento

L: lluvia máxima en 24 horas

10: factor de ajuste de unidades.

En este sistema existen variantes que a continuación se señalan:

9.2.3.1. Zanja trinchera

Consiste en abrir zanjas y bordos en forma discontinua sobre curva a nivel (SARH-COLPOS, 1982). Su longitud varía de 3 a 7m, dejando entre zanja y zanja un tabique divisor de unos 50 cm de longitud, que puede estar al nivel del terreno o un poco más abajo, a fin de comunicar el agua entre zanjas evitando, de este modo, escurrimientos violentos. La construcción se basa en una zanja de unos 40 cm de profundidad y ancho similar (Figura 44); la tierra, producto de la excavación es colocada aguas debajo de las zanjas, de manera que formen un borde de 30 a 35cm de alto, y con taludes que van de 1:1 a 1:2 según el material y pendiente del terreno, sobre estos bordos se realiza la plantación, por lo que debe ponerse mucho cuidado en su formación (Pimentel, 1987).

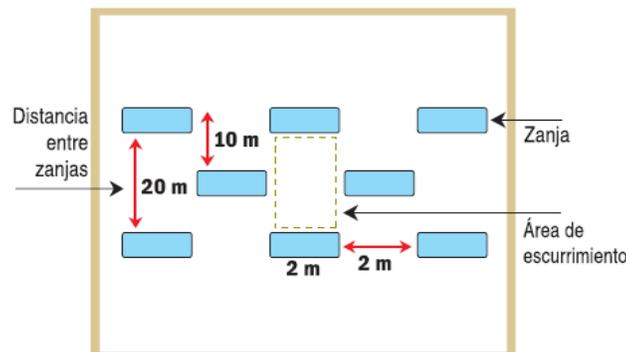


Figura 44. Diseño espacial de zanjas trincheras (Cardoza *et al.*, 2007).

9.2.3.2. Saucedá uno

Consiste en trazar bordos equidistantes, tomando como referencia las curvas a nivel (Figura 45). Sobre las curvas a nivel se determinan los sitios donde se establecerán las plantas; la distancia entre planta y planta debe ser mayor a 3 m, ya que la poca precipitación y la falta de elementos nutritivos del suelo puede causar problemas si se utiliza una distancia menor, la plantación se hace mediante el sistema de cepas (Pimentel, 1987). Aguas arriba del bordo, y a ambos lados de la cepa se abren zanjas de 0.8 m de largo por 0.5 m de ancho y 0.4 m de profundidad, que va disminuyendo conforme se aleja de la cepa hasta llegar a cero (SARH-COLPOS-COLPOS, 1982). Esta modalidad permite aprovechar los escurrimientos y controlar la erosión hídrica, por lo que se recomienda para las zonas áridas y semiáridas.

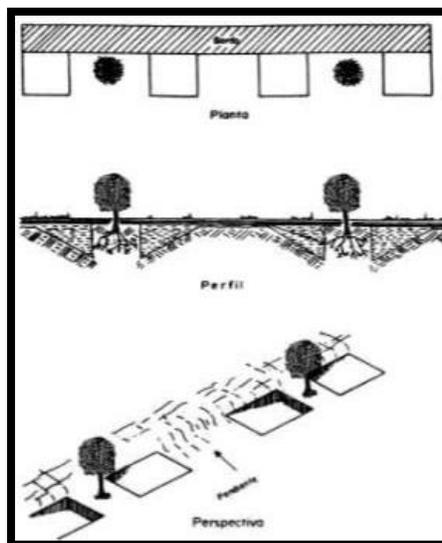


Figura 45. Sistema saucedá uno (INIF modificado por Pimentel, 2007)

9.2.3.3. Saucedá dos

Esta variante se diseñó para establecer comparaciones de efectividad de captación de agua de escurrimientos con el sistema anterior. Es muy similar al Saucedá uno; la diferencia está en que, tomando como centro el punto donde se colocó la planta, se traza un semicírculo con radio de 30 cm, posteriormente se traza otro semicírculo

de 70 cm de radio (Figura 46); la excavación se realiza en el área comprendida entre ambos semicírculos a una profundidad de 40cm (Pimentel, 1987).

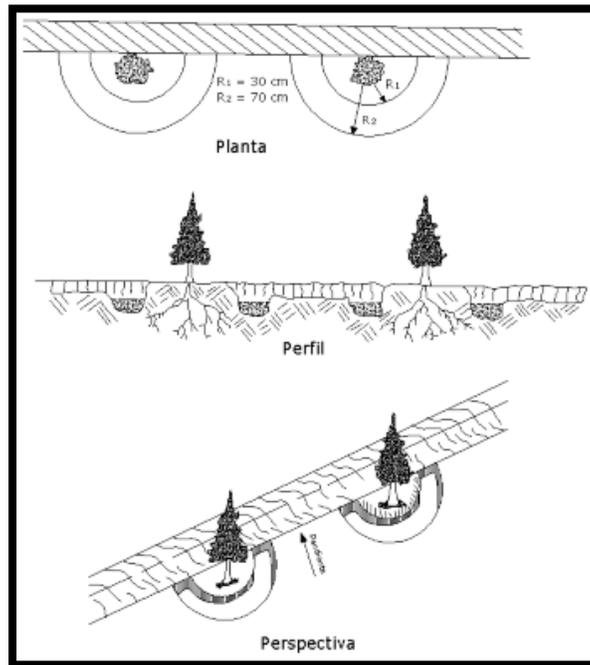


Figura 46. Sistema saucedado dos (INIF modificado por Pimentel, 2007)

9.2.4. SISTEMA ESPAÑOL

Se hace una cepa de 40cm de diámetro, con una profundidad similar; en torno a ella se construye un cajete de aproximadamente un metro de diámetro y una profundidad de unos 15cm en su parte más baja, lo que permite la captación de agua. La parte más profunda del cajete no coinciden con la cepa, de modo que si el arbolito queda inundado, solo sea temporalmente (Pimentel, 2007). Una vez colocada la planta, se acomodan tres piedras en torno a su base (Figura 47), estas piedras cumplen las siguientes propiedades (Verduzco, 1973; citado por Pimentel, 2007):

- ⇒ Evitar la evaporación del suelo;
- ⇒ Impedir la emergencia de malas hierbas;
- ⇒ Proteger la planta del pisoteo de los animales y de los incendios;
- ⇒ Amortizar las bajas temperaturas del invierno;

⇒ Retener el calor del sol.

En ciertas regiones esta práctica se convierte en desventaja, ya que el calor que refractan las piedras puede alcanzar gran magnitud (principalmente las calizas), que queman a las plantas pequeñas (Medrano, 1968 citado por Pimentel, 2007).

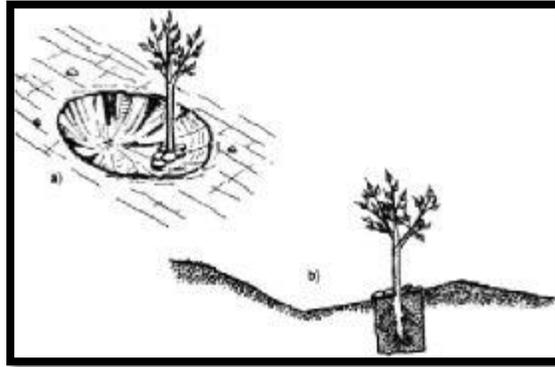


Figura 47. Sistema español. A) vista superior, b) corte lateral (INE, 2007)

9.2.5. ZANJA CIEGA

Consiste en abrir y volver a cegar una zanja de 40 cm de ancho, profundidad similar y largo variable, en función de las condiciones del terreno y siguiendo las curvas a nivel. Al igual que el sistema de cepas, en el momento de cegarla se comienza con la tierra extraída de la parte superior. Las plantas se colocan a mitad de la zanja. Se recomienda para terrenos de mediana calidad, donde la compactación del suelo impide un desarrollo radicular bajo el método de cepa común y en lugares con precipitación media anual superior a 500 mm (Pimentel, 2007).

9.2.6. SISTEMA NETZAHUALCÓYOTL

Este método es el más antiguo de los utilizados en México. Su construcción es a la inversa del sistema zanja trinchera, ya que la tierra se coloca aguas arriba, formando un bordo donde se pueden plantar árboles frutales, magueyes o nopales (Figura 48). Este método es ideal para agroforestería, ya que la construcción del bordo siguiendo las curvas de nivel obliga al agricultor a surcar al contorno, aumentando con ello la captación de agua. Así mismo la tierra erosionada es retenida por el

bordo, originando la formación de una terraza de formación sucesiva, proceso que se acelera barbechando de abajo hacia arriba, a fin de voltear la tierra siempre hacia abajo. Las zanjas están intercaladas a un nivel inferior del terreno natural para hacer más eficiente la distribución del agua y evitar las corrientes violentas (Pimentel, 2007).

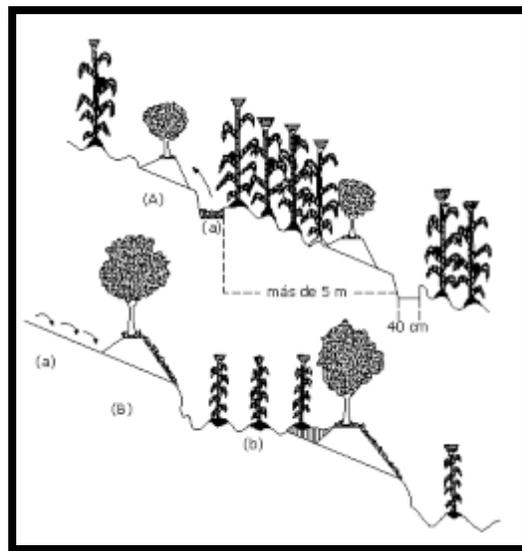


Figura 48. Sistema Nezahualcóyotl (Pimentel, 2007)

9.2.7. SISTEMA GRADONI

Puede considerarse un sistema mixto, ya que con frecuencia hace uso de la fuerza mecánica y de la tracción animal. Consiste de pequeñas banquetas o terracillas de 60 a 80 cm de ancho, con contrapendientes muy fuertes (mayores al 30%) que siguen las curvas a nivel (Figura 49). Entre menor sea la precipitación, se debe construir una terracilla más ancha. Para evitar cualquier defecto de nivelación, se colocan pequeños bordos transversales al eje de la banqueta o se deja un tramo sin construcción. El distanciamiento entre terracillas también está en función de la precipitación; a menor precipitación mayor separación y viceversa, aunque una medida aceptable es de 5 a 7 m, también se puede utilizar el desnivel vertical que puede variar de 0.5 a 3.0m. Las plantas se colocan en el tercio inferior de la terracilla, cuando se considere que no habrá estancamientos prolongados de agua o azolves prematuros, en caso contrario es preferible colocarlas a la mitad de la anchura de la banqueta, en ambos casos se utiliza cepa común. Una ladera

trabajada con este sistema tendrá escurrimientos superficiales reducidos y las plantas aprovecharán tanto el agua como los nutrientes sólidos de las corrientes, por lo que el agua que llegue a los cauces será de mejor calidad (Pimentel, 2007).

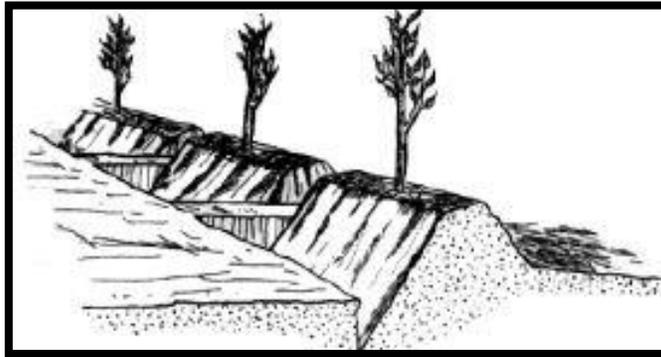


Figura 49. Sistema gradoni, vista lateral con corte (INE, 2007).

9.2.8. TERRAZAS

En términos generales, podemos hablar de dos grandes sistemas de terrazas en función de sus dimensiones y, por consiguiente, costos.

9.2.8.1. Terrazas de banco

Consisten de bancos o escalones que en las regiones de escasa precipitación se trazan y construyen siguiendo el contorno de las curvas de nivel. Generalmente se recomiendan con precipitaciones bajas o moderadas que no excedan los 750 mm anuales o donde el suelo sean profundos, con buena permeabilidad y capaces de absorber toda el agua de lluvia. Este tipo de terrazas se construye con un bordo y canal amplio a nivel, de manera que el agua se almacene a lo largo de la terraza. En ocasiones se cabecean los extremos para que en suelos permeables el agua se infiltre y desfogue mediante un drenaje externo. El principal inconveniente de las terrazas de banco son las altas inversiones que requiere, por lo que solo se usan los árboles frutales y forestales donde la producción amortice los altos costos de construcción (SARH-COLPOS-COLPOS, 1982).

9.2.8.2. Terrazas individuales

Es una modificación del sistema anterior que consiste en la construcción de un terraplén circular u ovalado alrededor de cada árbol. Permite controlar la erosión, un mejor manejo de los fertilizantes y son muy útiles en las regiones con bajas precipitaciones, donde es necesario conservar la humedad del suelo; en estas regiones el arreglo topológico puede ajustarse mediante la aplicación de la fórmula de Anaya, construyendo bordos a nivel para retener los escurrimientos superficiales (Figura 50). Se utilizan mucho en frutales, cafetales, cacaotales, etc., adaptándose muy bien en terrenos con pendientes del 5 al 40%. Sus principales limitantes son sus costos de construcción, la pendiente del terreno y la profundidad del suelo. En la construcción de estas terrazas de debe enfatizar en la preparación de la cepa y en la estabilidad de los taludes, tanto del área de corte como de relleno. La inclinación de los taludes debe ser de 1:1 a 1:2, para su diseño la SARH-COLPOS (1982), menciona el siguiente procedimiento:

- ✓ Calcular la pendiente media del terreno;
- ✓ Calcular el espaciamiento (E) que debe haber entre hileras de terrazas
- ✓ Trazar curvas a nivel a separaciones iguales al espaciamiento calculado. Cuando las curvas a nivel se separan demasiado, se debe intercalar alguna curva adicional; en caso de cerrarse se debe eliminar alguna de ellas.
- ✓ El espaciamiento que debe haber entre árboles y el diámetro de la terraza se calcula en base a las características y requerimientos de la especie a utilizar.

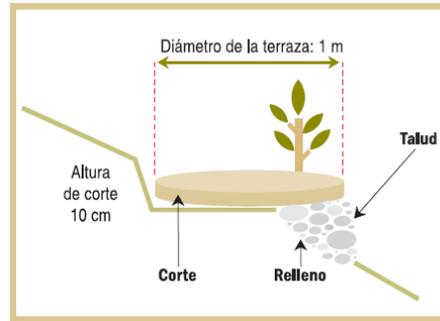


Figura 50. Sección transversal de una terraza individual (Cardoza et al., 2007).

9.2.9. MICROCUENCAS DE CAPTACIÓN

Se han desarrollado sistemas en los cuales el agua derramada desde algunas partes de un campo, se concentra en franjas en donde se plantan cultivos. El cultivo se siembra en franjas angostas entre amplios intervalos que se dividen con camellones formando cuencas de captación en miniatura. Estos camellones posteriormente se compactan para aumentar el derrame de agua hacia los surcos de los cultivos. Se considera que este sistema es más eficaz que el de barbecho, en que el agua se conserva de una estación a otra.

Se ha ideado otro método, llamado de “cuencas de captación” para aplicarlo en llanuras relativamente niveladas (con pendientes de hasta un 5%). El área se divide por medio de pequeñas franjas de tierra en parcelas rectangulares de suave pendiente. Las ventajas de estos métodos son la sencillez de su construcción y su costo relativamente bajo.

9.3. *Implementación de sistemas de riego más eficientes*

Orson y Vaughn (1985) mencionan que las zonas que necesitan ser regadas son muy extensas y se encuentran en todos los continentes. La franja árida está dividida en dos, las septentrionales, que se extiende desde el oeste de los Estados Unidos y México a España, Francia, Italia y Grecia, penetrando en el Asia menor hasta comprender la mayor parte de la India y China, y la meridional, que incluye la parte de Sudamérica que se encuentra al este de la cadena de los Andes, el sur del continente americano y la mayor parte de Sudáfrica, uniéndose a la septentrional

por la península arábiga y la India, para separarse posteriormente englobado, a Australia.

Los mismos autores expresan que estas regiones la civilización ha existido y existe en la actualidad gracias exclusivamente al arte y la ciencia del regadío. La lluvia y la nieve constituyen las fuentes principales del agua de riego según.

Muchos de los métodos de riego utilizados en las zonas áridas implican grandes pérdidas de agua debido a que humedecen una gran porción del suelo. La mayor parte de esta agua se pierde por evaporación, haciendo que el sistema de riego funciones de manera ineficiente. Mejorando el manejo del agua se puede lograr un ahorro considerable en la cantidad de agua requerida por un determinado cultivo, además de reducir la cantidad de mano de obra necesaria. Mediante un análisis de los diferentes métodos de riego, es posible obtener bases sólidas que permitan seleccionar, en primera instancia, al sistema más adecuado a las condiciones del lugar donde se utilizará, indicar las posibles modificaciones para hacerlo más práctico y económico.

10. MÉTODOS MÁS CARACTERÍSTICOS DE COLECTA, ALMACENAMIENTO Y CONSERVACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN LAS ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DEL CENTRO DE MÉXICO.

10.1. Delimitación del área

Los métodos presentados corresponden a algunos lugares de las zonas áridas de los estados de Querétaro, Hidalgo, San Luis Potosí, Estado de México y el Valle de Tehuacán, Puebla.

De manera muy general, la Altiplanicie Central comprende una penillanura de rocas sedimentarias mesozoicas, cubierta en parte por rocas volcánicas del Terciario y por depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario, con clima semiárido. Los suelos aluviales y lacustres son fértiles y sostienen una agricultura muy diversificada de riego y de temporal. En su parte Norte, la penillanura sedimentaria y las llanuras aluviales y lacustres están cubiertas por matorrales micrófilos desérticos y vegetación halófila; en las pendientes de origen sedimentario hay matorral rosetófilo. Sobre los suelos de origen volcánico prospera el matorral crasicáule, donde predominan las nopaleras: los nopales cardón (*Opuntia straptacantha*), duraznillo (*O. leucotricha*) y tapón (*O. robusta*) son los más comunes, además de ser los más importantes por su aprovechamiento; es muy posible que este tipo de vegetación sea de origen antrópico y represente una degradación de los pastizales (García, 1978). Los pastizales ocupan una extensión muy importante y cuentan con algunos pastos perennes de alta calidad forrajera, como es el caso de diversos zacates navajita (*Bouteloua spp*), el zacate chino (*Buchlœe dactyloides*) y el zacate pluma blanca (*Trichachne californica*). El mezquite, de suelos profundos y alto nivel freático, el matorral submontano, el chaparral enano, el piñonar de *Pinus cembroides* y los bosques de encino y de pino-encino que se encuentran en las cimas de las numerosas sierras menores que cruzan la Altiplanicie Central completan las formas de vegetación (García, 1978).

Por otro lado, entre el escudo Mixteco y la Sierra Madre Oriental, una gran falla dio origen al Valle de Tehuacán, en cuya parte más baja existió un lago. Este lago quedo

desecado al escurrir sus aguas hacia el Golfo de México por el estrecho y profundo cañón tallado por el río Santo Domingo, cabeza del Papaloapan. Los ríos que desembocaban en el lago quedaron capturados y también tallaron profundos cañones. Del mismo modo, el río de las Balsas corto a la Sierra Madre del Sur y desecó a los lagos que existían entre el Eje volcánico, la Sierra Madre del Sur y el Escudo Mixteco (López de Llergo, 1963); presentando actualmente un clima seco o estepario (BS) (García, 1983).

El uso del suelo en estas zonas áridas y las condiciones socioeconómicas presentes en el área de estudio son similares a las descritas para las demás zonas áridas de nuestro país, por ello no se entrará en detalle.

10.2. Descripción de los principales métodos de colecta y almacenamiento de agua de lluvia

A través de la revisión bibliográfica y observaciones, se logró ubicar y describir los siguientes métodos de colecta y almacenamiento del agua de lluvia que se utilizan en la zona centro de México:

- Los Jagüeyes;
- Los Aljibes;
- Pozos excavados en los lechos arenosos de los ríos;
- Presas
- Las Galerías Filtrantes del Valle de Tehuacán;
- Utilización de techos para colectar agua de lluvia, y;
- Agricultura de secano.

10.2.1. JAGÜEYES U "OLLAS DE AGUA"

Los jagüeyes u "ollas de agua", anteriormente mencionados, se han utilizado desde hace varios siglos para la colecta y almacenamiento del agua de lluvia. Existen

jagüeyes de diferentes tamaños, formas y contruidos con diversos materiales. El principio en que se basan consiste en conducir, mediante canales, el agua de los escurrimientos superficiales hasta la obra de captación. El típico jagüey es una construcción semicircular o bordo hecho de tierra, que sirve como una barrera de contención que almacena el agua de los escurrimientos superficiales que llegan a ella (Figura 51). A continuación se hará mención, más a detalle, de los diferentes tipos de jagüeyes que existen en la zona centro.



Figura 51. Vista de un jagüey en el Valle de Tehuacán (Stirton, 2009) (izq.) y aspecto general de un jagüey (dcha.).

10.2.1.1. Jagüey doméstico

Son semicírculos o bordos de pequeñas dimensiones hechos de tierra, contruidos cerca de la casa-habitación y que proveen de agua para uso doméstico. Su importancia radica en que retienen los escurrimientos superficiales derivados en torno a la casa, los almacenan y suministran agua para uso doméstico durante una buena temporada. Por ser de dimensiones pequeñas, no requieren de grandes inversiones y pueden satisfacer las necesidades de familias pequeñas. Al construirse cerca de la casa habitación, se evita el desperdicio de tiempo y esfuerzo que implica acarrear el agua de lugares distantes. Entre más lejos se encuentren las principales vías de comunicación, la importancia de estas obras aumenta considerablemente, ya que en muchos casos son el único suministro de agua con que cuentan los habitantes rurales. En tales casos, el agua captada y almacenada es utilizada para consumo humano. Es importante difundir en tales áreas algún tipo de medidas sanitarias tendientes a mejorar la calidad del agua almacenada, como es la construcción de cercos en torno a los jagüeyes para evitar la entrada de

animales o personas que puedan contaminar el agua, el hervir el agua antes de tomarla, etc.

Una buena alternativa para mejorar la calidad del agua es el utilizar una serie de filtros de arena por donde pase el agua, a fin de irla potabilizando; esta medida es muy sencilla y no requiere de grandes inversiones. Las pérdidas en el volumen del agua almacenada se deben, principalmente, a la evaporación y a la infiltración. Implementando alguna de las medidas ya comentadas al respecto, es posible aumentar significativamente, el tiempo en que estos jagüeyes proporcionan agua.

10.2.1.2. Jagüey equipado con filtros de arena

Un ejemplo de este sistema fue construido en el siglo pasado por los entonces dueños de La Hacienda (actualmente ejido) localizada a pocos kilómetros de la ciudad de Ezequiel Montes, a un costado de la carretera que va a San Joaquín, Oro. La obra es de grandes dimensiones y recibe los escurrimientos de las laderas adyacentes. El agua es retenida por un bordo semicircular de la tierra, recubierto en su interior con piedra acomodada. La obra de almacenamiento está rodeada por una alambrada de púas y un cerco vivo de nopales. Los canales que conducen los escurrimientos, al llegar al jagüey, tienen unas rejas metálicas que retienen los sedimentos y basuras que pudieran llevar. Posteriormente, existen dos trampas para retener el azolve. En ellos se depositan los sedimentos que no fueron retenidos en la reja metálica, lo que facilita notablemente su control.

Lo más relevante de esta obra es el sistema de purificación del agua almacenada mediante filtros de arena. Casi en el centro de la obra se observa una columna de piedra: las personas entrevistadas mencionaron que en su parte inferior cuenta con un filtro de arena, a través del cual pasa el agua hacia un conducto localizado en su interior que la lleva por gravedad hacia el exterior del jagüey. En el exterior y al final de dicho conducto, se encuentran otros dos filtros de arena, que no son más que un par de registros rellenos con este tipo de material. Ellos están conectados a un abrevadero, donde toma agua el ganado del ejido, calculado por los entrevistados, en unas 50 cabezas de ganado vacuno. Al parecer, el agua obtenida a través de

estos filtros es de buena calidad y se utilizaba para consumo humano, antes de que el ejido contara con un suministro de agua potable.

A pesar de ello, los ejidatarios siguen dándole mantenimiento a la obra, la cual les proporciona agua para el ganado durante casi todo el año. El mantenimiento se da mediante faenas comunitarias.

En la actualidad, esta obra tiene una importancia secundaria para los habitantes de la localidad, ya que ellos cuentan con un sistema de agua potable. Sin embargo, este tipo de obras representan una buena opción para proporcionar agua de mejor calidad a los habitantes de las regiones más alejadas y/o marginadas, lugares donde difícilmente llegara el suministro doméstico de agua potable por el alto costo que implica. El principio en que se basa este sistema de purificación del agua almacenada no requiere de altas inversiones y es sumamente sencillo y eficiente. Finalmente, esta obra fue muy bien diseñada y construida, ya que recibe una gran cantidad de agua, proveniente de las laderas adyacentes. Las principales pérdidas del agua almacenada se deben a evaporación e infiltración. Con un estudio se puede definir cuál de los métodos ya señalados es el más adecuado para este caso en particular.

10.2.1.3. Jagüey rectangular

La construcción de algunos jagüeyes de este tipo se remonta al siglo antepasado. Se basan en el mismo principio de los jagüeyes ya citados; la diferencia radica en la forma, ya que estos son rectangulares y son excavados en el suelo. La mayoría de ellos están recubiertos con piedra pegada con mezcla o cemento, lo que reduce sus pérdidas por infiltración. Las paredes laterales no son totalmente verticales, sino que tienen una inclinación hacia adentro en su parte inferior. El jagüey visitado cuenta con una obra adicional, construida más recientemente para almacenar los excesos de agua, que no podía almacenar la obra original. En esta última obra, se le adicionó un vertedor de demasías que conduce los excesos de agua hacia los canales de riego de los campos adyacentes. Este sistema aprovecha los escurrimientos de las laderas cercanas, pero no cuenta con trampas para sedimentos; por ello es necesario darle mantenimiento periódicamente, a fin de

evitar que el azolve reduzca su capacidad de almacenamiento. En uno de sus costados cuenta con escaleras para facilitar el acceso a las personas que van por agua. Estas obras proporcionan agua durante casi todo el año.

El principal uso que se le da al agua almacenada en estas obras es para consumo doméstico, a pesar de su mala calidad. Esto es una situación lamentable que implica la urgente necesidad de realizar algún tipo de acción tendiente a mejorar el suministro de agua en estas regiones.

10.2.1.4. Jagüey que utiliza las carreteras como área de captación

Estos sistemas se han difundido en la medida en que las carreteras pavimentadas se han extendido dentro de las zonas áridas. El agua es uno de los principales enemigos de los caminos, sean pavimentados o de terracería; por ello es necesaria la construcción de obras de drenaje que desalojen rápidamente los excesos de agua, lo que hace necesaria la construcción de canales y puentes de desagüe. Si se toma en cuenta que la mayor parte del agua de lluvia que cae sobre una capa de asfalto escurre, entonces es posible coleccionar una gran cantidad de agua de lluvia con un área de captación relativamente pequeña. Mediante la construcción de jagüeyes en lugares adyacentes a los desagües de los caminos se logra almacenar agua de buena calidad proveniente de las carreteras. En el desierto del Vizarrón (Querétaro), existen algunos jagüeyes de este tipo, que funcionan regularmente en cuanto a la captación de agua, mismos que hay que mejorarlos para evitar las pérdidas por infiltración y evaporación, lo cual es el principal problema.

10.2.1.5. Jagüey revestido con roca unida con cemento

Este sistema es el más nuevo en cuanto a los jagüeyes que se observaron. Es similar a los jagüeyes rectangulares, solo que el cuerpo de almacenamiento de agua esta revestida con una capa de piedra unida con cemento (Figura 52). Con ello se reducen considerablemente las pérdidas por infiltración, aunque implica una inversión mucho mayor. Algunas de estas obras, localizadas en el desierto de Vizarrón (Querétaro) fueron construidas como parte de un programa estatal durante la década de los 80's, aunque en su diseño y construcción no se tomaron en cuenta

las posibles pérdidas por evaporación. También cuentan con un cerco de alambre bien construido, lo que disminuye la contaminación del agua almacenada.



Figura 52. Jagüey con desarenador en Epazoyucan, Hidalgo (Galindo, 2006).

Estos son los jagüeyes más representativos de la zona de estudio. Todos ellos se basan en el mismo principio. La clasificación aquí presentada es solo para fines de exposición. Tal vez existan algunos otros tipos, pero se considera que las variantes que puedan presentar, en relación a los aquí expuestas, son mínimas.

10.2.2. ALJIBES

Estos sistemas de captación de agua de lluvia fueron introducidos por los españoles poco después de la conquista. Al respecto son significativas las palabras del Padre Ponce al referirse al Convento de San Cristóbal, Ecatepec, edificado en el siglo XVI: "El convento es bonito, hecho de cal y canto, con su claustro alto y bajo, celdas y dormitorios, faltábale la Iglesia y ésta tenía de prestado (una capilla abierta mirando al atrio). El agua que allí beben es llovidiza recógenla en un bonito aljibe..." (Tratado Curioso y Docto de Fray Antonio de Ciudad Real, citado por el P. Rojo, 1982, pag. 499).

En efecto, estos sistemas son adecuados y eficientes para recolectar el agua de lluvia. Se basan en el mismo principio de los jagüeyes, es decir, mediante canales (muchas veces adyacentes a los caminos y/o calles) recogen el agua de lluvia que cae sobre las colinas o laderas cercanas, conduciéndolas hacia los aljibes. Al igual

que los, jagüeyes, son cisternas abiertas, solo que construidas con piedra unida y forrada por ambos lados con argamasa (Figura 53).



Figura 53. Panorama de un aljibe.

En el desierto del Vizarrón, Querétaro se observa una obra de este tipo, la cual de acuerdo con los pobladores, es capaz de almacenar agua durante todo el año, a pesar de sufrir grandes pérdidas por evaporación, ya que es un reservorio abierto. Su forma es rectangular, con varios compartimientos en los cuales se almacena el agua de acuerdo al uso que se le vaya a dar. Por ello, en los costados se encuentran compartimientos que almacenan el agua que, aparentemente, ha sido filtrada mediante un ingenioso sistema de filtros de arena.

Un detalle que vale la pena mencionar, es el bonito modelo arquitectónico que tienen, de tipo colonial, con arcos y un portal que le da un toque muy provinciano, aunque ya muestra los estragos causados por el tiempo y la falta de mantenimiento. También cuenta con una serie de escaleras que facilita el tomar el agua a las personas que la necesitan. Anteriormente se utilizaba para consumo doméstico; en la actualidad solo se usa para los animales y regar los jardines cercanos. Un avance tecnológico lo constituye la adaptación de un sistema de bombeo que facilita el suministro de agua empleada en el riego de los jardines adyacentes.

10.2.3. POZOS EXCAVADOS EN LOS LECHOS DE LOS RÍOS

Como ya se mencionó, las lluvias que caen en las zonas áridas y semiáridas son de gran intensidad y corta duración. Por ello, es muy frecuente la formación de ríos torrenciales que en pocos minutos conducen grandes volúmenes a través de sus cauces causando grandes destrozos. A pesar de la gran velocidad a que corre el agua, una parte de ella queda almacenada en el subsuelo arenoso de los ríos. Según algunos informantes, esta agua es de buena calidad; se extrae mediante la construcción de pozos y se utiliza para uso doméstico. Estos sistemas son tan eficientes, que proporcionan agua durante la mayor parte del año y, en algunos casos, aún durante los años de sequía.

Estos sistemas no sufren pérdidas por evaporación. En realidad se considera que son los más adecuados para los lugares donde se utilizan, aunque adaptándoseles una bomba serían mucho más eficientes. También hace falta revestirlos y cubrirlos, de modo que el agua almacenada no corra peligro alguno de contaminarse.

10.2.4. PRESAS

El ejemplo más característico de este sistema lo constituye la Presa San José, localizada cerca de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P. Esta presa fue construida en 1903, siendo decretada la zona que la rodea en 1996 como área natural protegida. Al parecer, esta presa suministra gran parte del agua potable que se consume en la ciudad, pues abastece de agua a aproximadamente 16 % de la población de la ciudad de San Luis Potosí y área conurbada (Rodríguez, 2013). La obra tiene una altura considerable y recuerda la de una fortaleza de la Europa Medieval, debido al diseño utilizado en su construcción (Figura 54). Está provista de ductos por donde corre el agua para ventilarse y unos filtros de arena que contribuyen a mejorar la calidad del agua almacenada. La presa está bien ubicada y colecta el agua proveniente de muchas zonas montañosas adyacentes, por ello es capaz de suministrar agua durante todo el año. Las mayores pérdidas de agua se deben a efectos de la evaporación. Por ello se debe implementar alguna de las

alternativas existentes, aunque hace falta realizar una serie de estudios para determinar cuál es la más apropiada.



Figura 54. Aspecto de la Presa San José¹⁰, San Luis Potosí.

Cabe mencionar que las fuertes sequías que ocasionalmente azotan a esa parte del país, ha provocado el cierre temporal de la presa en algunas temporadas, además el atractivo turístico que tiene ha traído como consecuencia la mala disposición de residuos sólidos por parte de los turistas; finalmente un gran problema que viene acarreado la presa es el azolve, ya que actualmente se calcula que este azolve es de 5 millones de metros cúbicos, cuando la presa se había planeado inicialmente para 10 millones de m³ de capacidad, y aunque en ocasiones se organizan desazolves este sigue siendo un gran problema (Torres, 2013).

Las otras presas observadas son de menor importancia por su tamaño y capacidad de almacenamiento. En todas ellas las principales pérdidas de agua se deben a la evaporación e infiltración (Figura 55). En el desierto del Vizarrón, Querétaro, existe un sistema de presas compuesto por dos compartimientos, construidas de manera que los excesos de agua escurrida que la primera no era capaz de almacenar, se retienen en la segunda, ubicada en un nivel inferior a la primera. Este sistema suministra agua durante la mayor parte del año, aunque esta no es de muy buena calidad, por lo que se usa para lavar la ropa y dar de beber a los animales. Las principales pérdidas se deben a la evaporación en superficie del agua: como tienen

¹⁰ http://www.ensanluispotosi.com/Lugares_del_mundo/San_Luis_Potosi/San_Luis_Potosi.htm

de una superficie relativamente pequeña, es fácil implementar alguna de las medidas ya mencionadas, a fin de conservar la mayor cantidad de agua posible.



Figura 55. Vista de una presa mediana.

10.2.5. GALERÍAS FILTRANTES

Las "galerías filtrantes" son muy parecidas a los sistemas de "qanats" ya mencionados.

Al iniciar la investigación, se consultaron los trabajos de Wulff (1968) y de McNeish (1972), quedando sorprendidos por el ingenio y magnitud de las obras que ellos exponían. La cantidad de trabajo necesario que implica la construcción y mantenimiento de estos sistemas sumamente eficientes resulta extraordinaria, por ello, se describirán minuciosamente, en base al trabajo de McNeish (1972), que es muy detallado y objetivo. A continuación se presenta una síntesis del mismo.

10.2.5.1. Edad y origen de las galerías filtrantes

Al parecer, estos sistemas fueron introducidos por los conquistadores españoles; al respecto Blasquez (1957 citado por McNeish, 1972) comenta:

Las obras de esta naturaleza son de gran importancia en la región, al grado que hacen de ella la primera en la República, por su número y extensión. Este sistema de captación de aguas fue aplicado por primera vez en Tehuacán, por los frailes franciscanos, casi a raíz de la conquista, cuando fue creado el marquesado de Oaxaca y desde entonces se ha venido desarrollando la red de galerías hasta alcanzar la considerable extensión que hoy tienen.

McNeish hace una recopilación de la información para sostener la hipótesis de que la introducción de estos sistemas en el Valle de Tehuacán fue posterior a la llegada de los españoles. Él parte de los siguientes hechos:

- i. Estos sistemas se conocen localmente como “galerías”, “galerías filtrantes” y “aplantes con tragaluces”. A excepción del término “aplante” (derivado del Nahuatl “apanatl”, canal de agua), estos sistemas son denominados o referidos con vocablos españoles, lo que sugiere un origen hispano más que indígena de ellos.
- ii. El parentesco entre estos sistemas y los utilizados en Medio Oriente indica que España sólo sirvió como una vía de transmisión entre ambos lugares.
- iii. La excavación de estos sistemas con la utilización exclusiva de las herramientas hechas de madera y roca de que disponían los habitantes de la región en los tiempos prehispánicos, es sumamente difícil en comparación con el uso de herramientas metálicas introducidas en el siglo XVI.

Los informantes de McNeish, mencionaron que el primer sistema de galerías abierto en el valle de Tehuacán data de la primera década del siglo pasado, cuando un gran terrateniente necesitaba más agua para sus campos. También informaron que los sistemas abiertos en torno a la ciudad de Tehuacán son mucho más recientes que los localizados cerca de Chilac, Altapexi y Zinacatepec.

El desarrollo histórico de los qanats y su introducción en la Península Ibérica es resumido por McNeish de la siguiente manera:

El uso de los sistemas de qanats, aparentemente se inició en el siglo VIII a. de C., primero en Armenia y poco después en Nínive, en Mesopotamia. El uso de los qanats en Persia, evidentemente ocurrió hasta un siglo después, cuando se utilizaron para abastecer de agua a la ciudad de Ecbatana, la capital del Imperio Medo y actual ciudad de Hamadan; después se usaron para regar el área de Persopolis, una de las ciudades capitales del Imperio de Aquemene. Con la expansión de este imperio y, por consiguiente, su esfera de influencia en el siglo V

a. C., la técnica de excavación de los qanats pasó a Egipto. Los qanats fueron fácilmente adaptados en el Oasis Kharga donde las condiciones climáticas y geomorfológicas son muy similares a las montañas y paisajes áridos de Persia. De Egipto, los qanats aparentemente se extendieron a la región central y noroeste del Sahara, donde tuvieron una importancia secundaria en relación a la alcanzada en Persia. La expansión de la excavación de qanats dentro de estas áreas, probablemente fue favorecida por las invasiones árabes de 984 y 1280 d.C. Hacia finales del siglo XIII, y posiblemente desde el siglo X o XI, los qanats funcionaron en la actualmente ciudad abandonada de Sadrata, situada al sur de la actual ciudad de Quargla. A fines del siglo XII, esta técnica fue introducida en la región Morocco de Marruecos.

El último eslabón de la cadena de transferencia de los qanats hacia la Península Ibérica y, por consiguiente a España, fue puesto a la luz por el trabajo de J. Oliver Asin (1959, in McNeish, 1972), un maestro español en materia Arabe. Mediante su trabajo de campo y revisión bibliográfica. Asin localizó un sistema de galerías subterráneas en la ciudad de Madrid. A través de la revisión documental, Asin estableció la fecha de construcción de este sistema en el año 1202. Al parecer, este trabajo fue empezado por los invasores árabes, quienes transformaron la villa existente en una fortaleza. Después de la salida de los árabes, se estableció la ciudad de Madrid. En un estudio posterior, Asin notó que el nombre Madrid es una derivación del término híbrido árabe-español "Mayrit", combinación del término árabe "Mayra" ("galería de agua") y la terminación "it", una derivación del latín "vulgar" "etum" (español "edo").

10.2.5.2. Función e importancia

La principal función de estos sistemas es proporcionar agua para uso doméstico y para riego. Debido al constante aumento en la agricultura de riego y la constante reducción en el suministro de agua subterránea, McNeish (1972) señala que los habitantes de la porción norte del Valle, usan estos sistemas para aumentar el suministro de muchas fuentes naturales de agua. Una función secundaria es

suministrar agua para bebidas y baños medicinales, muy comunes en esta región y que forman la base de la economía primaria de Tehuacán y de su desarrollo industrial. Originalmente, las fuentes satisfacían adecuadamente estas necesidades, pero la creciente popularidad y el consecuente incremento en el número de las plantas embotelladoras hacen del uso de las galerías una necesidad.

También proporcionaron agua para las plantas hidroeléctricas de la parte Norte del Valle. Muchas galerías fueron excavadas de manera que converjan en el generador de energía de la planta. En la ahora planta abandonada hidroeléctrica No. 2, a 3 km al sur de la ciudad de Tehuacán, algunas de las galerías fueron abiertas con el doble propósito de servir como fuente de energía a la planta y cubrir los requerimientos de la agricultura. Estas plantas fueron abandonadas debido a los altos costos, la baja producción de electricidad y el tremendo gasto de agua subterránea.

De las observaciones de campo hechas en el presente trabajo, se deduce que la principal función de la galería que se visitó es suministrar agua para riego y consumo doméstico. Se debe mencionar que los sistemas de riego han permitido un buen desarrollo agrícola; resulta curioso el contraste en los tonos de la vegetación entre los terrenos agrícolas (casi siempre verdes) y la vegetación natural. Por ello se ve una serie de colores, los cuales varían de acuerdo con el tipo, etapa de desarrollo y manejo, correspondiente a cada tipo de uso del suelo.

10.2.5.3. Aspectos fisiográficos

Los sistemas de galerías tienden a ser más frecuentemente excavados en los suelos "inclinados" de la porción Norte del Valle; muchos comienzan a los pies de las montañas y justo donde inciden los cañones de los montes.

Estos sistemas funcionan por medio de la penetración del manto freático de los acuíferos profundos, muy comunes en esta región. La situación geológica e hidrológica del valle es diferente a la existente en el Medio Oriente. Esta diferencia consiste en el elemento que actúa como filtro y que sirve para taladrar el manto freático del agua. Los sistemas de Tehuacán frecuentemente también sirven para penetrar los acuíferos someros localizados entre ellos o separados por un estrato

geológico muy impermeable. El pozo estratificado que recorre el depósito Cuaternario de la formación del Cerro de la Mesa permite una rápida percolación del agua y la formación de acuíferos; el terreno es lo suficientemente suave para facilitar la excavación de galerías. En la zona Sur del Valle, generalmente al sur de la línea trazada a través de los pueblo de Chilac, Miahuatlan y Zinacatepec terminan los depósitos porosos y se endurece el subsuelo; piedras calizas menos permeables, piedras areniscas, etc., caracterizan la estructura geológica de ahí en adelante. Correspondientemente, las características del drenaje también cambian, por lo que los manantiales de agua son más abundantes.

Un factor final tiende a desanimar la construcción de las galerías en esta zona: como es considerable la presencia de yeso en la porción Sur del Valle, el agua obtenida por medio de las galerías puede estar muy cargada con partículas de dicho material haciéndola inutilizable y perjudicial para las plantas y suelos. Por estas razones, la mayor parte de los sistemas de galerías se localizan en la parte Norte del Valle.

10.2.5.4. Excavación y mantenimiento

Los siguientes datos en el proceso de excavación y mantenimiento de las galerías, presentados por McNeish (1972), se complementaron mediante entrevistas con excavadores con mucha experiencia y observaciones personales.

La excavación de las galerías se realiza utilizando únicamente herramientas manuales: palas, picos y una corta, pero afilada, barra de hierro. Muchas veces, estas herramientas fueron modificadas de su forma original para adaptarlas a las necesidades particulares de trabajo.

A pesar de que el costo inicial de las galerías es alto, estos sistemas proporcionan un suministro de agua durante muchos años. Esto permite producir más y mejores cultivos durante todo el año, además de tener agua disponible casi a cualquier hora.

La técnica utilizada en la planificación y realización es relativamente sencilla, aunque muy ingeniosa. El primer paso consiste en una observación preliminar del área por un "maestro", quien es un experto en la planificación y excavación de estos sistemas. De ahí se puede seguir uno de los métodos existentes dependiendo,

principalmente, de las características geológicas e hidrológicas que son determinadas por el *maistro* a través de su gran experiencia o por sus observaciones en la flora, suelo, pendiente y exposición geológica del terreno. El primer método involucra la excavación de un pozo vertical de 50 a 100 m sobre el punto donde el *maistro* calcula que el túnel horizontal debe interceptarse con la superficie del terreno. En el segundo método, el primer pozo es excavado en el lugar donde el *maistro* supone que está la mayor fuente de agua. Casi todos los trabajos subsecuentes en el sistema que empieza de esta manera, proceden cuesta abajo en dirección hacia los campos agrícolas. En ambos métodos el primer pozo (ventila) sirve para saber hasta qué profundidad se puede obtener una buena corriente de agua. Es importante señalar que ambos métodos, aparentemente también son utilizados en Medio Oriente (Bémont, 1961; Cressey, 1958, citados por McNeish, 1972).

La localización y profundidad de las demás ventilas, así como su espaciamiento se determina en base a una línea trazada hacia abajo o hacia arriba de la primera ventila. Esta línea es localizada directamente sobre la dirección que seguirá el túnel subterráneo horizontal, tomando en cuenta la topografía, exposiciones geológicas y otros pozos o manantiales cercanos.

Para determinar la profundidad que debe tener cada ventila, solo se utiliza una cuerda, una piedra o una bola de plomo, muchas estacas y un rústico nivel. El procedimiento es el siguiente: una cuerda atada con una bola de plomo se deja caer hasta el nivel del agua en el primer pozo, haciendo una marca en la cuerda en el punto donde coincide con la superficie del suelo. Una segunda cuerda se extiende del nivel del bordo de la primera ventila a una estaca puesta sobre la tierra en el punto donde se excavara la segunda ventila. En tiempos más recientes, estas cuerdas se nivelaron utilizando un nivel de burbuja, aunque anteriormente se nivelaba por medio de agujeros visuales. La información no fue muy clara al respecto. La distancia entre la superficie del terreno en el cual la estaca se colocó y el punto donde la cuerda nivelada pasa sobre la estaca indica la diferencia vertical entre las dos ventilas en el nivel del terreno. Esta distancia es restada de la primera cuerda, indicando así la distancia entre el nivel del terreno y el nivel del agua en la

primera ventila para obtener, con una precisión con pocos centímetros de error, la profundidad a que el agua debe circular en la segunda ventila. Este procedimiento es repetido para cada ventila a lo largo del sistema hasta terminar, o cuando exista una corta distancia entre la última ventila y el punto donde saldrá a la superficie el canal subterráneo horizontal. Hay mucha similitud entre la manera como se realiza la excavación de galerías en el Valle de Tehuacán y los descritos por Wulff (1968), anteriormente señalados.

El tercer paso en el trabajo es la excavación de las ventilas. Grupos de 2 o 3 hombres trabajan en esta tarea, rotándose en las labores que realizan. Uno remueve la tierra, la recoge y pone en los cubos; un segundo hombre lleva los cubos a la superficie y un tercer trabajador cambia los cubos llenos por vacíos, y depositando los escombros en torno a la ventila. Los materiales sacados de la ventila y de los túneles forman los clásicos montones circulares de tierra, que rodean a cada ventila. Se determinó que estos desperdicios presentan muestras de los efectos de la erosión hídrica y eólica. En las áreas habitadas y donde pasta el ganado, estos montones son altos y escarpados o son sustituidos por paredes de albañilería, generalmente de un metro de altura.

Los cubos de tierra son sacados de las ventilas por medio de dos mecanismos. El más común es una armadura triangular de grandes tablas o estacas que sostienen un sistema de poleas, conectadas con un torno. Este fue el mecanismo que se observó funcionar en la limpieza de algunos sistemas. Este tipo de armazones también se usa en la obtención de agua para fines domésticos y agrícolas. El segundo mecanismo consiste solo de un torno colocado sobre o cerca de las ventilas. La presencia de largueros en forma de “Y” a los lados de las ventilas que se abren o cierran indican el uso de un torno portátil más pequeño.

El paso final en la construcción de las galerías incluye la excavación de un túnel horizontal que une a las ventilas por su base. A un tiempo, varios grupos trabajan en esta labor. Los grupos generalmente son de 3 hombres que tienen las mismas funciones que las ya referidas en la construcción de las ventilas. Un cuarto

trabajador es el encargado de proveer a los trabajadores con cubos vacíos y llevar los llenos a la superficie.

Si la sección más baja o inclinada no penetra el manto de agua o acuífero, esta debe ser la primera parte excavada del túnel. Si el sistema es grande, dos o más grupos trabajan de manera independiente o bien, los excavadores trabajan en ventilas adjuntas y abren el túnel a manera de encontrarse. El trabajo en la pequeña sección del túnel se hace de abajo hacia arriba o viceversa' desde la primera ventila hacia la fuente de agua. El túnel se extiende hacia abajo de la ladera hasta donde sale a la superficie del terreno, terminando en un canal que riega los campos. Este canal se continúa por un tramo colina abajo de modo que la corriente del sistema pueda estar disponible si no se desea almacenar dentro del túnel. Todos los trabajadores, excepto un excavador y su ayudante salen del túnel cuando se aproximan al acuífero. Este excavador continúa trabajando con sumo cuidado para no abrir demasiado el túnel o romper por encima del acuífero, evitando que se ocasione una corriente violenta de agua. Cuando se perfora un manto de agua, el trabajador regresa hasta la ventila más cercana, colocándose en un lugar seguro. Cuando la corriente es fuerte y hay peligro de derrumbes o de ser ahogado, el trabajador sale del túnel hasta que la corriente es más moderada. Solo se necesita cavar unos 50 o 60 cm dentro del túnel para perforar el acuífero. Cada una de las siguientes ventilas es conectada paulatinamente.

Varios métodos fueron mencionados por medio de los cuales los excavadores siguen un curso recto para interceptar cada una de las ventilas. Uno de ellos se basa en el peso de dos cuerdas, que se extienden a ambos lados de la ventila; otro consiste de 2 ó 3 velas colocadas en forma alineada en el piso del túnel, a partir del fondo de las ventilas. En ambos casos, el excavador se alinea tomando como referencia las proyecciones de las cuerdas o velas, por medio de una perspectiva. Las velas son el método más usado ya que se pueden ver a mayor distancia. Otra técnica mencionada por McNeish consiste en utilizar un complicado sistema espejos proporciona un constante punto de iluminación en el centro del pozo, aunque no profundiza en los detalles.

Para evitar accidentes, el mantenimiento normal de un sistema se realiza una o dos veces al año. Consiste de una minuciosa inspección de todo el sistema para detectar posibles anomalías. Si hay peligro de derrumbes, las paredes y techos del túnel son asegurados con puntales de madera pesada, aunque generalmente esto no es necesario. Una segunda fase en el mantenimiento es la limpieza del piso y paredes del sistema. Los carbonatos de calcio acarreados en suspensión por la corriente de agua se depositan e impiden que circule normalmente el agua. La limpieza incluye el uso de palas y picos, así como barras afiladas de acero para picar desde lejos una sección obstruida por escombros. La limpieza se realiza por grupos de 2 o 3 hombres que usan el mismo equipo y trabajan casi de la misma manera que la ya descrita en la excavación del sistema. El grado de depositación determina la limpieza debe hacerse una o dos veces al año; ello está en función del gasto de la corriente.

Trabajos más a fondo son necesarios en las galerías cuando se desea aumentar la corriente de agua o si el nivel del manto freático bajo. La corriente es generalmente aumentada, continuando la excavación del túnel a un nivel superior de la primera ventila más retirada de la entrada del sistema. Muchos túneles laterales son también excavados a los lados del túnel principal para incrementar el área que recibe el agua del acuífero. Se pueden hacer modificaciones cuando la fuente de agua es pequeña a fin aumentar el volumen de la corriente que sale de las galerías. Una de ellas es bajar el piso del túnel en todo el sistema, hasta que se perfora en forma adecuada el acuífero, de manera que se obtenga un volumen conveniente de agua. La segunda modificación es menos drástica, así como menos costosa: consiste en abrir una o más galerías auxiliares que se conectan al túnel horizontal, extendiéndose hacia arriba y hacia afuera de la pendiente para incrementar el área del sistema que recibe el agua o perforar nuevos acuíferos.

10.2.5.5. Observaciones particulares

Cerca de San Juan Ajalpan, Puebla existen una galería filtrante, administrada por una nombrada sociedad del agua. La manera de cómo funciona la sociedad es a través "acciones"; cada acción equivale a cada uno de los días del mes. Así mismo,

el dueño de cada acción dispone de un día para regar sus campos o vender el riego, según le convenga. De esta manera se distribuye el agua proveniente de la galería entre los diferentes miembros de la sociedad. Al existir un derrumbe del túnel horizontal se procede a realizar una serie de trabajos como a continuación se describen:

Para solucionar este inconveniente, se construye un túnel horizontal que rodea la sección derrumbada, conectándose más adelante con el túnel que permanece en buen estado. Las paredes y el techo de esta nueva sección se recubren con placas rectangulares de concreto, a fin de evitar posibles derrumbes posteriores. Los encargados de realizar esta labor generalmente son cuatro personas.

Para ello se instala un sistema de malacate en una de las ventilas, el cual usan tanto para llegar al túnel horizontal como para sacar o introducir materiales; en el primer caso, los escombros extraídos del túnel. Dos de las personas ya grandes se encargaban de manejar el malacate. Los otros dos trabajaban en el túnel horizontal.

El volumen de material que han extraído de las entrañas de la tierra durante la excavación del túnel auxiliar (que a pesar de ser muy grande, no tiene comparación con la cantidad de tierra extraída en la construcción de todo el sistema) y siguiendo con el gran esfuerzo que representa el tener que introducir y llevar hasta el lugar donde se colocaran, el gran número de bloques de concreto necesarios para reforzar las paredes y techo del túnel horizontal. Esto requiere un gran esfuerzo y desgaste por parte de los trabajadores (Figura 56).



Figura 56. Túneles horizontal y vertical de una galería en Tehuacán, Puebla.

En relación al sistema de malacate empleado en esta tarea, está hecho con troncos unidos mediante lazos, formando un triángulo sobre la superficie de la ventila. La cuerda se enrolla en otro tronco, montado sobre una base a manera de torno. A pesar de su sencillez, este sistema ha resultado bastante efectivo en la realización de los trabajos antes señalados.

Tanto el presidente de la sociedad de agua como los trabajadores conocen la existencia de algunas poblaciones donde sus habitantes se han dedicado a la excavación y mantenimiento de los sistemas de galerías durante varias generaciones.

Un hecho con el que no se está de acuerdo es el bajo salario otorgado a los trabajadores. Una medida que sirve para compensar los bajos ingresos de estos trabajadores, es el poder tomar de las zonas agrícolas adyacentes a su lugar de trabajo parte de los alimentos que consumen cotidianamente (por ejemplo elotes). A pesar de ello, se considera que se deben tomarse medidas que ayuden a mejorar el nivel de vida de estos trabajadores.

Por último, es importante recordar que las galerías filtrantes del Valle de Tehuacán tienen las mismas ventajas y limitantes de los qanats, ya oportunamente mencionadas. Se debe remarcar que el agua suministrada por una galería fluye ininterrumpidamente, por lo que si no se utiliza se desperdicia. Esto hace necesaria la adaptación de obras adicionales que permitan almacenar, al menos durante cierto tiempo, el agua obtenida.

10.2.6. AGRICULTURA DE SECANO

En la zona centro del país se desarrollan diversas variantes de la agricultura de secano. A continuación se hará una breve exposición de cada una de estas variantes, así como las principales prácticas agrícolas reportadas por el autor antes citado y que, como ya se mencionó, se tuvo oportunidad de observar en campo.

10.2.6.1. Agricultura de temporal

Es la variante más generalizada y consiste en el aprovechamiento *in situ* del agua de lluvia; se asocia a un paisaje de topografía plana o ligeramente ondulada que favorece la infiltración sobre el lugar donde cae la lluvia. En este sistema los rendimientos son, generalmente, bajos y solo se obtiene una cosecha por año (en algunas zonas solo es posible producir cultivos en años alternos). Los principales inconvenientes a que se enfrenta este sistema son:

- La ocurrencia de un 75 a 85% del total de la precipitación durante los meses más calientes del año, ocasiona altas pérdidas por evapotranspiración;
- El periodo libre de heladas se presenta, generalmente, de finales de marzo a fines de septiembre, lo que recorta aún más la estación de crecimiento de los posibles cultivos a producir.

10.2.6.2. Agricultura en bajíos

El suministro de humedad se da mediante el manejo de los escurrimientos superficiales que se canalizan hasta las partes bajas o depresiones endorreicas conocidas como "bajíos"; esto implica el tener que coleccionar los escurrimientos de las laderas y conducirlos hasta los terrenos agrícolas. Gracias a los aportes adicionales de humedad, aumentan las posibilidades de éxito en la producción de los cultivos y se puede tener más de un ciclo de producción por año.

10.2.6.3. Agricultura de dispersión

En este sistema se realizan una serie de obras que desvían, conducen y regulan el agua de las corrientes ocasionales que: drenan de las serranías cercanas, permitiendo un uso del suelo más intensivo. Las principales obras que caracterizan estos sistemas son:

xvi. Obras de desviación

Durante el régimen de las haciendas era posible construir costosas obras de mampostería (llamados "encalados") a fin de desviar las avenidas o torrentes y suministrar el agua necesaria a los campos de cultivo. Actualmente, la mayoría de

estas obras han sido abandonadas, ya que requieren de una gran organización de trabajo colectivo para su mantenimiento, cosa que no es posible, ya que después del reparto agrario quedaron fraccionadas entre varios ejidos, los cuales no lograron ponerse de acuerdo para continuar utilizándolas. En su lugar se emplean obras más rudimentarias y pequeñas, como las construidas con postes de mezquites de 1 a 1.5 m de altura, clavados sobre dos líneas y separados 50 cm uno de otro; entre ellos se colocan ramas que se comprimen y cubren con una capa de tierra, repitiendo esta operación hasta alcanzar la altura deseada. En una variante de este sistema se colocan tendidos de ramas de mezquite sobre los que se sobrepone otro de piedras, repitiendo la operación hasta alcanzar la altura deseada y alternando el sentido de los troncos de las ramas en cada tendido.

Otro tipo de obras de desviación es la construcción de cortinas o diques de mampostería dentro del cauce en forma paralela a una de los márgenes, de donde se desvía gradualmente hasta conectarse con la obra de conducción (estas obras no guardan una posición transversal al cauce, como las anteriores). Independientemente de los materiales utilizados, las obras de desviación deben de construirse varios kilómetros aguas arriba de los campos de cultivo, para poder regarlos por gravedad y evitar el empleo de sistemas de bombeo.

xvii. Obras de conducción

El agua desviada es conducida por gravedad a través de canales construidos con implementos manuales; a estos canales se les llama "fonjas" o "acequias", similares a los mencionados párrafos arriba. Estas obras pueden llegar hasta los terrenos de cultivo e inundarlos o se construyen de manera que lleguen hasta las últimas parcelas del "plan", abriendo "boquillas" (tomas) para suministrar agua a las parcelas.

xviii. Obras de regulación y manejo

Dentro de este tipo de obras se encuentra la construcción de terrazas que tienen las siguientes finalidades:

- Disminuir la erosión y velocidad de la corriente de agua;

- Mejorar la distribución de agua en el terreno agrícola;
- Aumentar la infiltración de agua en el suelo;
- Retener los materiales de arrastre, manteniendo la fertilidad de los suelos.

Los bordos se trazan y construyen por los mismos campesinos, basándose en conocimientos empíricos; debido a la antigüedad de, las terrazas se han corregido los errores tenidos en su diseño. Una práctica adicional es la plantación de especies perennes, como el nopal y el maguey, que mejoran el aprovechamiento y conservación del agua y suelo, además de aportar productos alimenticios y forrajeros.

Otras obras de regulación son los "estacados" o "enlamados"; que consisten en clavar estacas de 50 a 80 cm de largo entretejidas con ramas de mezquite. Se construyen cuando la velocidad' de la corriente es alta y puede causar pérdidas de suelo. Las "costillas de piedra" son obras similares, aunque menos usadas; se construyen con piedra acomodada en los sitios donde se han formado pequeñas cárcavas y se pretende retener los sedimentos arrastrados por el agua. El mantenimiento de las obras de desviación y conducción se efectúa, generalmente, con la participación colectiva de todos los beneficiarios de las mismas, mientras que las obras de regulación y manejo se reparan individualmente.

Estos son los métodos de cosecha y conservación de agua de lluvia observados durante los recorridos de campo. Tal vez existan algunas otras variantes que no fue posible ubicar, pero como ya mencionamos estos son los más representativos. Las ventajas y desventajas de cada uno de ellos son similares a los ya mencionados en la monografía.

11. DISCUSIÓN

Únicamente 2.5 % (35 millones de km³) del agua presente en el mundo, corresponde a agua dulce; de ésta 68.9 % se encuentra congelada y en la humedad del suelo, 30.8 % se almacena en aguas subterráneas y poco menos de 0.3 % es agua superficial localizada en lagos, lagunas, ríos y humedales (PNUMA, 2004). Menos del 1 % del agua dulce del mundo (cerca de 200,000 km³) está disponible para el uso humano y los ecosistemas (PNUMA, 2004). De ahí la importancia de emplear obras para conservación y captación de agua atmosférica que ayuden a reducir los problemas de escasez de agua, ya que este es un líquido vital, es decir es indispensable para la sobrevivencia, salud y bienestar de los seres vivos.

La diversidad de climas y relieves en el mundo provoca una distribución discriminada de las lluvias. Desde los inicios de la humanidad, en las regiones áridas y semiáridas han existido problemas de sequía, dado que la distribución de las lluvias es errática, escasa y torrencial, además las fuertes temperaturas ambientales que se presentan provocan una alta tasa de evaporación, reduciendo aún más el agua aprovechable por el hombre.

En este sentido, el agua es un recurso sumamente importante e impulsor del desarrollo de las zonas áridas, ya que la producción económica y la calidad de vida dependen directamente de la disponibilidad de este recurso, por lo que épocas prolongadas de escasez del líquido pueden derivar en grandes pérdidas económicas o incluso graves problemas de salud a nivel local o regional.

La cosecha del agua de lluvia y los diferentes métodos de conservación del agua in situ, son una alternativa para afrontar la escasez del agua y sus devastadoras consecuencias. Ya que facilitan, aceleran y reducen el costo del acceso, en comparación con los largos recorridos que generalmente hace la gente hacia el suministro de agua más cercano en la época de estiaje, además son una opción factible para satisfacer las necesidades de agua en comunidades dispersas, siempre y cuando las obras sean hechas bajo una buena planeación y organización.

Los sistemas de cosecha de agua de lluvia en la mayoría de los casos incluyen materiales económicos y rústicos, por lo que son de fácil acceso y no requieren de alta ingeniería, además llegan a ser tan eficientes en la captación de agua que podrían ser una alternativa para el desarrollo de una comunidad o bien, para complementar su abasto de agua. Como en el Ejido San Felipe en el municipio de Dr. Arroyo, Nuevo León, donde se puso en marcha desde 1996 el proyecto Agua y Vida coordinado por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y la Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA); se construyeron cinco cisternas y un techo cuenca con el fin de suministrar agua a 100 personas en todo el año, los resultados fueron exitosos ya que durante 15 años el Ejido San Felipe no tuvo problemas de abasto de agua y en años críticos de sequía apoyó a comunidades vecinas, actualmente el Ejido se posiciona como un sitio de transferencia de tecnología y desarrolla varios proyectos productivos a base del uso de agua colectada, como lo expresa Manzano (2011).

Entre los sistemas de cosecha de lluvia más importantes, debido a su uso generalizado y potencial, son los techos cuenca y los sistemas de captación a nivel piso (cisternas), aunque todas las técnicas de cosecha de agua de lluvia contemplan beneficios prometedores y sus diseños dependen más que nada de las condiciones físicas y sociales de los sitios.

Por otra parte, el abastecimiento de agua a través del aprovechamiento de los mantos acuíferos, cada vez está siendo más difícil e inaccesible debido a la explotación irracional y el consecuente agotamiento que han sufrido los manantiales subterráneos. De los 654 acuíferos del país, actualmente 102 se encuentran sobre explotados, la CNA (2004) estima que las reservas de agua subterráneas decrecen a un ritmo de 6 km³ por año, sin embargo esta cifra no es promedio para zonas áridas donde la condición es aún más crítica como lo mencionan Carabias y Landa (2005). Otro problema que se añade a la explotación del agua fósil es la salinización de los acuíferos y de las tierras agrícolas debido al riego.

Actualmente zonas con mayor precipitación han sido objeto de carencia de agua, por lo que las técnicas empleadas por los pobladores de las zonas áridas para

cosechar agua de lluvia han cobrado mayor interés, no sólo para esas áreas, sino también para las grandes ciudades con problemas de abastecimiento y agotamiento de acuíferos como la Ciudad de México y el área metropolitana, por mencionar algunas.

Partiendo de lo anterior y teniendo en cuenta que alrededor del 50 % del territorio nacional corresponde a tierras secas, es imprescindible la difusión y divulgación de las técnicas de manejo del agua de lluvia que se han implementado en diferentes partes de México y del mundo para enfrentar la escasez de agua, así como sus resultados y alcances. Como pudo apreciarse en la monografía, durante muchos siglos pobladores de los desiertos orientales ha implementado sus propias técnicas de cosecha de agua para abastecer el consumo humano y además desarrollar una amplia agricultura. De ahí la importancia de la presente monografía, que conjuga diferentes técnicas antiguas y actuales, así como ejemplos de su aplicación y resultados en México, con el fin de brindar una serie de metodologías básicas para todo aquel que tenga interés en desarrollarlas y difundirlas.

Asimismo, cabe destacar que las aguas captadas pueden destinarse hacia usos para la conservación de los ecosistemas; como lo proponen Estrela *et al.* (2008), quienes expresan que la cosecha de agua de niebla es un método factible para la instalación de depósitos de agua para la extinción de incendios forestales en lugares donde por acceso y distancias el transporte de agua sería tardado y costoso, de acuerdo con ello el almacenamiento de agua de lluvia también constituye una opción potencial para tal fin.

Finalmente, la implementación de programas gubernamentales y sociales bajo estas perspectivas en las zonas áridas y semiáridas del país, constituyen una opción para abastecer la demanda de agua potable, dejando atrás la sobreexplotación de los mantos acuíferos; esto a su vez, abriría camino hacia un desarrollo sustentable de estas regiones; pues el aprovechamiento de estos sistemas para complementar el abasto de agua, puede coadyuvar al desarrollo de nuevas fuentes económicas, como la producción de cultivos alternativos, sin que ello signifique la pérdida del recurso agua.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo presentado conjuga diferentes técnicas empleadas en diferentes partes del mundo con el único fin de mostrar una amplia variedad de técnicas para la cosecha de agua de lluvia en zonas áridas y semiáridas de México y el mundo. Y de acuerdo a la información compilada se obtienen las siguientes conclusiones sobre el uso de las técnicas de cosecha de agua de lluvia y las zonas áridas y semiáridas:

1. En las zonas áridas, los tres factores limitantes para el desarrollo son:
 - a. La baja precipitación y escasez del agua.
 - b. El carácter aleatorio de las lluvias, ya que pueden presentarse años de buena precipitación, como años de escasez de lluvia.
 - c. La forma torrencial en que se presentan las precipitaciones.
2. Los sistemas empleados en México para el manejo del agua y sus obras, no difieren en mucho de los utilizados en otras partes del mundo, como en el Medio Oriente.
3. En el entendido de que en 1 m² se capturan 10 L de agua con 10 mm de precipitación pluvial, países con escasa precipitación han resuelto sus problemas de escasez.
4. Las principales obras de cosecha de agua de lluvia en la zona del centro del país son los jagüeyes, asimismo los sistemas ampliamente implementados para el aprovechamiento de agua subterránea son las galerías filtrantes o qanats.
5. La escasez de agua se puede resolver mediante los sistemas de cosecha de agua de lluvia y otros, ya que se han obtenidos resultados satisfactorios al implementar estas obras.
6. La mayoría de los sistemas de cosecha de agua de lluvia son tecnologías no muy caras que pueden emplearse en el medio rural. Siempre y cuando se les proporcione mantenimiento a las obras.

7. La calidad del agua obtenida mediante estos métodos es la adecuada para consumo animal, sin embargo mediante un sencillo sistema de filtros es posible su utilización en actividades domésticas.
8. La cosecha de agua de lluvia es una alternativa para abastecer de agua potable no sólo a las regiones secas, sino también para grandes ciudades y poblados donde actualmente se presentan problemas de escasez de agua, como es el caso del Distrito Federal.
9. Las obras para la cosecha de agua de lluvia, incluyen infraestructura para canalizar los escurrimientos superficiales, lo cual disminuye el proceso de erosión hídrica causada por las lluvias torrenciales.
10. Además, estas obras tienen potencial para implementarse en la conservación de los recursos biológicos, implementándolos como; reservorios de agua para la extinción de incendios, suministro de agua para reservas naturales, abastecimiento de agua para UMA's, abastecimiento de agua a plantaciones de reforestación en épocas críticas, entre otras.
11. La implementación de estos sistemas ha dado buenos resultados en México, sin embargo, el agua subterránea no ha dejado de ser la fuente principal de suministro. El aprovechamiento del agua de lluvia representa una solución a la disminución de las reservas de aguas subterráneas, que actualmente se encuentran en una situación crítica debido a la sobreexplotación de las mismas.
12. Es necesaria una difusión de los métodos de cosecha de agua de lluvia en las zonas con problemas de escasez de agua, ya sea mediante talleres, folletos, exposiciones en ferias de desarrollo o campañas, para que los pobladores de esas áreas conozcan una alternativa más para la solucionar sus problemas de escasez.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguado A., J. (2010). *Obtener agua del aire*. Obtenido de Madrid: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/05/04/131450>.
- Aguirre R., J. R. (1979). *Enfoque para el estudio de las actividades agrícolas en el Altiplano Potosino-Zacatecano*. Manuscrito inédito. Texcoco, Edo. de México: Colegio de Postgraduados.
- Alvear A., C. (1968). *Historia de México: época precortesiana, colonial e independiente*. (9a ed.). México: Editorial Jus.
- Anaya G., M. (1977). *Technology and Desertification*. In ONU, United Nations Conference on Desertification: August 29-September 9, 1977, Nairobi, Kenya,. Nairobi, Kenya: ONU.
- Anaya G., M. (1978). *La tecnología como instrumento para combatir la desertificación*. En F. Medellín L. (Ed.), *La desertificación en México* (pp. 81-92). San Luis Potosí: UASLP-IIZA.
- Bautista O., A. L., Tovar S., J. L., Palacios V., O. L., Mancilla V., O. R. (2011). *La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico*. *Agrociencia* 45 (3): 293-301.
- Beysens, D., & Milimouk, I. (2000). *The case for alternative fresh water resources*. Pour les resourser alternatives en eau. *Secheresse* 11(4): 1-16.
- CANACINTRA. (2013). *CANACINTRA y la CEA se suman para el Proyecto Agua de Niebla*. Obtenido de CANACINTRA Querétaro: <http://canacintraqro.org.mx/v1/canacintra-y-la-cea-se-suman-para-el-proyecto-agua-de-niebla/>
- Carabias, J. y Landa., R. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad: hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México*. Collado, J. y Martínez., P. (Cols.). México: UNAM-COLMEX-Fundación Gonzalo Río Arronte.
- Cardoza V., R., Cuevas F., L., García C., J., Guerrero H., J., González O., J., Hernández M., H., y Tejeda S., C. (2007). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales: Manual de obras y prácticas*. Zapopan, Jalisco: CONAFOR.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) y Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2005). *Tecnologías de abastecimiento de agua en poblaciones dispersas*. Lima, Perú: CEPIS-OPS.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). *Agua Subterránea*. Obtenido de CONAGUA: Comisión Nacional de Agua: <http://www.cna.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=62&n3=62>
- CONABIO (Comision Nacional Para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad). (1990). *Precipitación media anual de México*. Escala 1:4'000,000.
- CONABIO. (2008). *Diversidad biológica de tierras áridas y sub-húmedas en México*. Obtenido de CONABIO: http://www.conabio.gob.mx/institucion/cooperacion_internacional/doctos/dbt_mexico.html

- Conciencia Sustentable. (2013). *Una turbina que cosecha agua del aire*. Obtenido de Conciencia Sustentable: <http://conciencia-sustentable.abilia.mx/una-turbina-que-cosecha%C2%B4-agua-en-el-aire/>
- Contreras B., S. (1968). *Perspecticas de la Ictio-fauna en las zonas áridas del Norte de México*. En Simposio internacional sobre el aumento de la producción de alimentos en las zonas áridas. Monterrey, N. L., Méx. Pp. 293-304.
- Corell, D., Estrela, M. J., & Valiente, J. A. (2011). *Obtenció d'aigua a partir de la boira al Montnegre i en altres llocs del litoral mediterrani*. L'Aulet – La revista del Montnegre i el Corredor (11): 21-25.
- Cluff B, C. (1981). *Surface storage for water-harvesting agrisistems*. In Rainfal Collection for Agriculrure in Arid and semiarid Regions. Commonwealth Agricultural Bureaux. Pp. 23-30.
- Dixon, R. M. (1980). *Rangeland imprinter*. In M. Missoula, *34th annual report, vegetative rehabilitation & equipment workshop; 1980 February 10–11; San Diego, CA*. (p. 8). San Diego, CA., United States: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Missoula Equipment Development Center.
- Domínguez A., A. (2009). Ollas de agua, jagüeyes, cajas de agua o aljibes. Retrieved from SAGARPA: <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/Ollas%20de%20agua.pdf>
- Estrela, M., Corell, D. & Valiente, J. (2008). *La captura de agua de niebla en el abastecimiento de balsas de extinción de incendios forestales*. Simposio Nacional Sobre Incendios Forestales (SINIF), (pp. 1-5). Popop, Alicante, España.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (1976). *Conservación de suelos para los países en desarrollo: Boletín de suelos 30*. Roma: FAO.
- FAO. (2000). *Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia: experiencias en América Latina. Serie zonas áridas y semiáridas No. 13*. Santiago, Chile: Oficina Regional para América Latina y El Caribe, FAO.
- Fattorelli, S., & Fernandez, P. C. (2011). *Diseño hidrológico*. (2a ed. Digital). Retrieved from INA: http://www.ina.gov.ar/pdf/Libro_diseno_hidrologico_edicion_digital.pdf
- Fernandez R., D. S., Martínez M., M. R., Tavarez E., C. A., Ricardo, C. V., y Salas M., R. (2012). *Estimación de las demandas de consumo de agua*. Texcoco, México: SAGARPA-COLPOS.
- Foster, S., & Tuinof, A. (2004). *Brazil, Kenya: Subsurface Dams to Augment Groundwater Storage in Basement Terrain for Human Subsistence*. Retrieved from The World Bank, global water partnership associate program: http://siteresources.worldbank.org/INTWRD/Resources/GWMATE_English_CP_05.pdf
- Frasier, G. W. (1975). *Water harvesting: A source of livestock Water*. Journal of Range Managemet, 28(6), 429-434.
- Frasier, G. W. (S.f.). *Water harvesting for rageland water suplies: A historic perspective*. Retrieved from College of LawArizona State University: College of Law: http://www.law.asu.edu/LinkClick.aspx?fileticket=_7Xk6RPBYRM%3D&tabid=2047

- Frasier, G. W., & Myers, L. E. (1983). *Handbook of water harvesting*. United States of America: United States Department of Agriculture.
- Galindo E., E., Palerm V., J., Tovar S., J. L. y Rodarte. G., R. (2008). Organización social en la gestión de una fuente de agua. *Agrociencia*, (42), 233-242.
- Gallegos V., C. (1985). *Contribución al conocimiento de los sistemas de producción de cosechas de secano del area de estudio del CREZAS-CP*. Texcoco, Edo. de México: Universidad Autónoma Chapingo.
- García C., F. (1978). *Marco Geográfico de la Desertificación en México*. En M. Anaya G., J. R. Ballín C, & F. Medellín L. (Ed.), *La Desertificación en México* (pp. 35-54). San Luis Potosí, San Luis Potosí, México: U. A. S. L. P.
- García de M., E. (1983). *Apuntes de climatología* (3a ed.). Ciudad de México: UNAM.
- Hanson, G., & Nilsson, A. (1986). *Ground-water Dams for Rural-Water Supplies in Developing Countries*. *Ground Water*, 24(4), 497-506.
- Howard, G., & Bartram, J. (2003). *Domestic water quantity, service level and health*. Ginebra: OMS.
- INE (Instituto Nacional de Ecología). (2007). *Preparación del terreno para la reforestación*. Obtenido de INE: <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/21/reforest.html>
- MacNeisch, R. S. (1972). *The prehistory of the Tehuacan Valley, Vol 4 Chronology and irrigation*. Austin, Texas: University of Texas Press.
- Maliva, R., & Missimer, T. (2012). *Arid Lands Water Evaluation and Management*. London: Springer.
- Manzano C., M. (2011). *Programa agua y vida: por una cultura del uso sostenible del agua en zonas aridas*. Nuevo León: ITESM.
- Mundo M., M., Martínez A., P., Hernández B., L., Delgado B., A., & García V., N. H. (1997). *Tecnologías alternativas para el suministro de agua y saneamiento en pequeñas comunidades rurales*. En M. Anaya G., y E. Salazar S. (Eds.), *Memorias de la IV Reunión Nacional Sobre Sistemas de Captación de Agua de lluvia* (6 al 9 de octubre de 1997, Torreón, Coah, México) (pp. 87-111). México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas.
- Myers, L. E. (1974). *Water harvesting, 2000 BC to 1974 AD*. Phoenix, Arizona.
- National Academy of Sciences. (2001). *More Water for Arid Lands: Promising Technologies and Research Opportunities*. (U. P. Pacific, Ed.) Honolulu: The Minerva Group, Inc.
- Noriega, J. S. (1974). *Desconcertantes panoramas de México: Problemas de México vistos por un viejo*. México.
- Nosetto, M. D., Baldi, G., Mercau, J. L., Wehrle, A., Murray, F., Gimenez, R., Giestbrecht, W. (2012). *Reporte de visita a productores del Chaco Paraguayo: Cosecha de agua*. Obtenido de Inundaciones, sequía y agricultura en la llanura Chaco-Pampeana: Adaptación a los cambios climáticos e hidrológicos. : http://www.agrohidrollanuras.unsl.edu.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=63%3A5-cosecha-de-agua&Itemid=70
- Organization of American States (OAS), United Nations Environment Programme (UNEP), & International Environmental Technology Centre (IETC). (1997). *Source Book of*

Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean. Washington: Unit of Sustainable Development and Environment General Secretariat, Organization of American States.

- Orson Winso, I., y Vaughn E., H. (1985). *Principios y aplicaciones del riego*. España: Reverté S. A.
- Pimentel B., L. (2007). *La preparación manual del terreno con fines forestales: serie de apoyo*. Texcoco, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Prinz, D. (1996). *Water Harvesting: Past and Future*. In P. L. S. (Ed.), *Sustainability of Irrigated Agriculture* (pp. 135-144). Balkema, Rotterdam: Springer.
- PNUMA. (2004). *GEO: Year Book 2003*. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- TCEQ (Texas Commission of Environmental Quality). (2007). *Harvesting, storing and treating rainwater for domestic use*. Austin, Texas, United States: Texas Commission of Environmental Quality.
- Reij, C., Mulder, P., & Begemann, L. (1988). *Water harvesting for plant production: World Bank Technical Paper Number 91*. Washington D. C.: The World Bank.
- Rodríguez, M. (2013). *Limpian presa de San José*. Obtenido de PULSO: <http://pulsoslp.com.mx/2013/03/24/limpian-presa-de-san-jose/>
- Rodríguez Q., R., Morales H., D., y Obando V., L. (2010). *Propuesta de estrategia nacional de desarrollo de las opciones técnicas para la cosecha de lluvia y su utilización en sistemas de riego*. Nicoya, Costa Rica: Universidad Nacional, CEMEDE.
- Rojas M., P., Gonzalez G., R., & Reyes C., P. (Eds.). (1968). *Simposio Internacional sobre el Aumento de la Producción de Alimentos en Zonas Áridas: Resúmenes. Abstracts*. Monterrey: ITESM.
- Román L., R. (1999). *Obtención de agua potable por métodos no tradicionales*. Obtenido de Ciencia al Día internacional: <http://www.ciencia.cl/CienciaAlDia/volumen2/numero2/articulos/articulo2.html>
- Salas, J. D. (2000, Diciembre). *Hidrología de zonas áridas y semiáridas*. Ingeniería del agua, 7(4), 409-429.
- Salinas A., A., Rodríguez Q., R., & Morales H., D. (2010). *Manual de especificaciones técnicas básicas para la elaboración de estructuras de captación de agua de lluvia (SCALL) en el sector agropecuario de Costa Rica y recomendaciones para su utilización*. Nicoya: Universidad Nacional, CEMEDE.
- SARH-COLPOS-COLPOS. (1982). *Manual de Conservación del Suelo y del Agua: Instructivo*. 2ª (ed). Texcoco, Edo. de México: COLPOS.
- Soler R., M. (1968). *Requerimientos de la educación para adultos*. En P. Rojas M., P. Gonzalez G., & P. Reyes C. (Eds.), *Simposio Internacional sobre el Aumento de la Producción de Alimentos en Zonas Áridas: Resúmenes. Abstracts*. (p. 27). Monterrey: ITESM.
- Stirton, B. & Getty. (2009). *Tehuacán: destino a la divina*. Obtenido de Circle of blue: <http://www.circleofblue.org/waternews/2010/world/tehuacan-divining-destiny-en-espanol/>

- Thames, J. L. (1989). *Water harvesting*. In FAO, Role of forestry in combating desertification (FAO Conservation Guides) (pp. 234-252). Rome: Food and agriculture organization of the united nations.
- Thames, J. L., & Fischer, J. N. (2009). *Management of water resources in arid lands*. In D. W. Goodall, & R. A. Perry (Eds.), Arid Land Ecosystems: Volume 2, Structure, Functioning and Management (Digitally ed., pp. 519-548). New York: Cambridge University Press.
- Torres, A. (2013). *Continúan trabajos de desasolve en la Presa San José*. Obtenido de PLANOINFORMATIVO.com: <http://planoinformativo.com/nota/id/246533/>
- Velasco Molina, H. A. (1991). *Las zonas áridas y semiáridas: sus características y manejo*. México, México: Editorial Limusa S. A. de C. V.
- Vera Nicolás, P. (2005). *Murcia y el agua: Historia de una pasión*. Murcia: Asamblea Regional de Murcia - Real Academia Alfonso X El Sabio-LA VERDAD. Obtenido de La Verdad: http://servicios.laverdad.es/murcia_agua/
- Vince, G. (2010). Out of the mist. *Science*, 330(6005), 750-751.
- Wulff, H. E. (1968). The qanats of Iran. *Scientific American* (218), 94-101.

ANEXO 1. MAPA DE PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL DE LAS ZONAS ÁRIDAS, SEMIÁRIDAS Y SECAS DEL PAÍS.

