



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE EDAFOLOGIA**

## **CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES CON SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA**

**JOSÉ MARÍA LEÓN VILLALOBOS**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

**2012**

La presente tesis titulada: “**CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES CON SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA**” realizada por el alumno: “**José María León Villalobos**”, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS  
EDAFOLOGÍA**

**CONSEJO PARTICULAR**

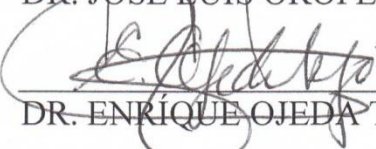
CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
DR. MANUEL ANAYA GARDUÑO

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. ENRIQUE OJEDA TREJO

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. DANTE ARTURO RODRÍGUEZ TREJO

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
M.C. JORGE LUIS GARCÍA RODRÍGUEZ

Montecillo, Texcoco, estado de México, septiembre de 2012

## **RESUMEN**

### **CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES CON SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA**

**José María León Villalobos, M.C.**

**Colegio de Postgraduados, 2012**

Las aeronaves se han convertido en el medio más eficaz, rápido y moderno en la lucha contra los megaincendios forestales; el agua, elemento operativo fundamental está limitada en disponibilidad, reduciendo la eficiencia de la labor. Los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL), pueden ser usados para solucionar la escasez de agua en el control aéreo de incendios forestales y su ubicación estratégica en zonas de alta incidencia es primordial para mejorar la eficiencia en el control de incendios y salvaguardar los bosques mexicanos. En este estudio se realizó una evaluación de la aptitud territorial para establecer SCALL en tres municipios del estado de México: Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca, mediante la selección de cinco variables determinantes: velocidad de viento, distancia a caminos, escurrimiento superficial, evaporación y densidad de incendios. Estas fueron cartografiadas y priorizadas con el apoyo de conocimiento experto, para finalmente ser integradas por el método de decisión multicriterio. Se identificaron en el área de estudio dos zonas con aptitud, que satisfacían a la mayoría de las variables, una al norte y la otra al sur. Asimismo, se concluyó que la identificación de áreas con aptitud a través de este método representa una herramienta útil para establecer los SCALL. Por otra parte, al incluir el conocimiento experto así como visitas de campo, se puede definir el mejor sitio y diseño de SCALL más costeable y de menor impacto ambiental. Una alternativa para mejorar la disponibilidad de fuentes de agua son los SCALL. En este estudio se diseñó un SCALL para apoyar el control aéreo de incendios en el oriente del estado de México; para ello, se estimó la demanda de agua con base en el 10 % de los incendios que afectaron superficies a partir de 5 ha así como la Precipitación Neta, con probabilidad del 80% de ocurrencia; como área de captación

se recurrió a la impermeabilización de laderas. En el diseño de los sistemas de almacenamiento se empleó la Precipitación Máxima al 90% de probabilidad para tener un amplio margen de seguridad, asimismo se propuso el diseño de sedimentadores en cada sistema. La ubicación de los SCALL fue definida usando conocimiento local, SIG y recorridos de campo. Se implementó una red de SCALL con los sitios identificados considerando una distancia de 10 km lineales respecto de la fuente de los incendios y una separación entre los sistemas de captación de 5 km. Se consideraron también en el diseño otros parámetros de funcionalidad como son: señalización y coordenadas de los sitios. Debido a que los sitios de ubicación de los SCALL se encuentran en un Área Natural Protegida, se propuso una rampa de seguridad en cada sistema de almacenamiento para facilitar la salida de las aves cuando el depósito permanezca abierto.

.  
Palabras clave: Análisis multicriterio, control aéreo de incendios forestales, área de captación, conocimiento local, probabilidad de lluvia.

## **ABSTRACT**

### **CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES CON SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA**

**José María León Villalobos, M.C.**

**Colegio de Postgraduados, 2012**

The aero tech fire forest fighting is the most effective, fast and modern technique to fight against mega-forest fire, the availability of water near the fire areas is a fundamental operative element in the process, but is limited by its distribution and volume, this situation reduce the efficiency of the practice. Rainwater harvesting system can be used to the Aero Tech fire-fighting in order to improve the practice, its strategic location in places with high recurrence of fire is necessary to improve the efficiency in the fire - fighting with a helicopter. In this study a spatial analysis for the evaluation of the suitability for the location of rain water harvesting (RWH) for aero fire-fighting is developed for three municipalities Chalco, Ixtapaluca and Tlalmanalco, in east of Mexico state, Mexico. Five variables were used for the selection of sites: wind speed, distance to roads, runoff, evaporation and wildfire density. Each variable was grade consulting the experts and a multi-criteria decision rule was performed to integrate them in a map. Potential for RWH that met most of the criteria established are found in north and south of the study area. The conclusions are that the identification of suitability places with the proposed method is a useful tool to establish RWH. Expert knowledge and field visit could be helpful to select the best place and design for RWH systems, reducing cost and environmental impacts. An alternative to improve the availability and location of sources of water is the Rain Water Harvesting (RWH) systems. In this study, a RHW system was design with this purpose for the east of Mexico state, the system is based on the water requirement demand to fight the 10 % of the fires in this area, that have had a surface area of more than 5 ha and with the estimation of a Net Precipitation with 80% of probability for the collecting area. For the area of collection of water in the up slope area a waterproofing PVC membrane is used. For the design of the storage system, a maximum precipitation with 90% probability is used, to have a safe threshold. To prevent sedimentation on

the storage system, a sedimentation tank is designed. The location of the RHW is identified using local knowledge, GIS, Land suitability in the field. A RWH network for aero tech fire forest fighting is implemented considering 10 km of distance from the fire source to the potential sites for water storage and a distance of 5 km to each other. Some operational parameters are considered for the design: location signals, location coordinates of the places. The area of study is a Natural Protected Place, by this situation a ramp for birds is considered for the storage tank to avoid the drowning of the birds when tanks are opened.

*Key words:* Multicriteria analysis, wildfire fighting, catchment area, local knowledge, precipitation probability.

## **AGRADECIMIENTOS**

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada y que me ha permitido alcanzar mi formación durante estos dos años.**

**Al Colegio de Postgraduados y al área de Edafología, valiosas instituciones en el campo de la agronomía y del desarrollo rural, sinceramente gracias.**

**Al Dr. Manuel Anaya Garduño por su conocimiento brindado en el campo de los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia.**

**Al Dr. Enrique Ojeda Trejo, le agradezco su tiempo, apoyo, facilidades y consejos dados durante el proceso de la maestría.**

**Al Dr. José Luis Oropeza Mota, gracias por la confianza brindada.**

**Al Dr. Dante Arturo Rodríguez, gracias por los ánimos y la confianza en mi propuesta para apoyar a la solución de un problema por demás urgente, los incendios forestales.**

**Al M.C. Jorge Luis García por su paciencia y disposición.**

**A los amigos y colegas del posgrado, que al compartir sus experiencias conmigo me retroalimentaron y fortalecieron.**

**Al área de génesis de suelos, con cuyos académicos y colegas estudiantes compartí buena parte de los cursos, fue una grata experiencia.**

**Gracias DIOS, sin tu presencia nada de lo anterior hubiera sido posible.**

## DEDICATORIA

*“Un viaje de mil millas comienza con el primer paso”*

*Lao – tsé.*

**Dedico esta tesis a mis padres, Manuela y Margarito, sin sus enseñanzas nunca hubiera llegado a mí el gusto por el conocimiento y aprendizaje constante. Este es tan sólo otro paso.**

**A mis hermanas, Tete y Ely, compartieron con migo dos años de otra etapa académica, vivimos y comentamos las largas jornadas de estudio tuyas y mías, cada uno en sus ámbitos e instituciones académicas.**

**A mis amigos cercanos con los que hemos emprendido una aventura laboral en la que estoy seguro tendremos éxito y con los que compartí más de una vez mis progresos en el COLPOS: Salvador, Aminta y Mara. Gracias por sus consejos, paciencia y ánimo.**

**A todos aquellos familiares y amigos que me impulsan a continuar en este camino.**

**José María León Villalobos**



## CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
<b>1. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
<i>1.1.Situación de los incendios forestales en México.....</i>	<i>5</i>
<i>1.2.Situación de los incendios forestales en el estado de México .....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.1. Los incendios forestales en la zona oriente del estado de México .....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.2 El combate de los incendios forestales en el estado de México .....</i>	<i>10</i>
<i>1.2.3 El combate de incendios con el empleo de helicóptero.....</i>	<i>11</i>
<i>1.2.4 Las necesidades de agua en el combate de incendios.....</i>	<i>12</i>
<i>1.3.Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) y el abastecimiento de agua.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.1. Antecedentes de los SCALL.....</i>	<i>13</i>
<i>1.3.2. Usos actuales de los SCALL.....</i>	<i>14</i>
<i>1.3.3. Componentes de un SCALL .....</i>	<i>16</i>
<i>1.3.4 Tipos de sistema de almacenamiento. ....</i>	<i>34</i>
<i>1.4.Los sistemas de información geográfica y la planeación territorial. ....</i>	<i>40</i>
<i>1.4.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG) participativos. ....</i>	<i>41</i>
<i>1.4.2 Análisis de aptitud con técnicas multicriterio.....</i>	<i>43</i>
<i>1.4.3. El análisis multiatributo.....</i>	<i>43</i>
<i>1.5.El conocimiento local. ....</i>	<i>47</i>
<i>1.5.1. Las metodologías participativas.....</i>	<i>48</i>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>50</b>
<b>CAPÍTULO 3. APTITUD TERRITORIAL PARA ESTABLECER SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CONTRA INCENDIOS FORESTALES .....</b>	<b>57</b>

<b>RESUMEN .....</b>	<b>58</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>59</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>59</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
<i>Área de estudio.....</i>	<i>61</i>
<i>Selección de variables.....</i>	<i>61</i>
<i>Tratamiento de variables.....</i>	<i>62</i>
<i>Elaboración del mapa de aptitud territorial.....</i>	<i>65</i>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>70</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>73</b>
<b>CAPÍTULO 4. RED DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA PARA EL CONTROL AÉREO DE INCENDIOS FORESTALES .....</b>	<b>76</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>77</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>78</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>78</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>80</b>
<i>Localización y descripción del área de estudio .....</i>	<i>80</i>
<i>Metodología.....</i>	<i>81</i>
1) <i>Selección de estaciones y tratamiento los datos de precipitación pluvial.....</i>	<i>81</i>
2) <i>Precipitación Neta:.....</i>	<i>82</i>
3) <i>Cálculo de la demanda de agua .....</i>	<i>82</i>
4) <i>Cálculo del área efectiva de captación .....</i>	<i>83</i>
5) <i>Cálculo del volumen del sedimentador .....</i>	<i>84</i>

6) Cálculo del diámetro y longitud de la tubería para conducir el volumen de agua recolectada. ....	<b>85</b>
7) Cálculo del sistema de almacenamiento.....	<b>86</b>
8) Microlocalización de los sitios para establecer SCALL de control de incendios forestales.....	<b>87</b>
9) Criterios a considerar en el diseño de una red de SCALL para control aéreo de incendios forestales. .....	<b>88</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>88</b>
1) Selección de estaciones y tratamiento los datos de precipitación pluvial.....	<b>88</b>
2) Precipitación Neta.....	<b>88</b>
3) Cálculo de la demanda de agua.....	<b>89</b>
4) Cálculo del Área efectiva de captación.....	<b>90</b>
5) Cálculo del volumen del sedimentador.....	<b>92</b>
6) Cálculo diámetro y longitud de tubería. ....	<b>92</b>
7) Cálculo del sistema de almacenamiento.....	<b>93</b>
8) Microlocalización de los sitios para establecer SCALL de control de incendios forestales. ....	<b>95</b>
9) Red de SCALL para control aéreo de incendios forestales.....	<b>96</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>99</b>
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>102</b>
<b>CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>105</b>
<b>CAPÍTULO 7. ANEXOS.....</b>	<b>105</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

### Capítulo 2

Cuadro 1. Dimensiones de los tanques de almacenamiento metálicos .....	38
Cuadro 2. Dimensiones de los depósitos flexibles con malla de acero .....	40

### Capítulo 3

Cuadro 1. Clases, superficies y priorización de la variable velocidad de viento.....	66
Cuadro 2. Clases, superficies y priorización de la variable distancia a caminos.....	66
Cuadro 3. Clases, superficies y priorización de la variable escurrimiento superficial.....	67
Cuadro 4. Clases, superficies y priorización de la variable evaporación.....	68
Cuadro 5. Clases, superficies y priorización de la variable densidad de incendios.....	69
Cuadro 6. Superficie de cada categoría de aptitud encontrada en el área de estudio.....	70

### Capítulo 4

Cuadro 1. Demanda de agua para el control aéreo de incendios forestales por municipio .....	90
Cuadro 2. Áreas efectivas de captación total, ajustada y modular por municipio.....	91
Cuadro 3 .Dimensiones de sábanas de PVC propuestas para el Aec de cada SCALL por municipio.....	91
Cuadro 4. Diseño y dimensiones de los sedimentadores por SCALL y por municipio.....	92
Cuadro 5. Dimensiones de los tanques metálicos circulares propuestos .....	94
Cuadro 6. Parajes y restricciones para la instalación de SCALL por municipio.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2

Figura 1. Superficie afectada por incendios forestales en el periodo 1996 – 2011 en México. 2011.....	7
Figura 2. Número de incendios forestales en el periodo 1996 – 2011 en México.....	7
Figura 3. Helicóptero Bell. (a) Helicóptero Bell con Bambi Bucket ®; (b) Helicóptero Bell en operación. ....	11
Figura 4. Sistemas de anclaje. (a) Anclaje de coronación con zanja; (b) Anclaje de coronación con lastrado.....	21
Figura 5. Sedimentador en planta y corte longitudinal. Fuente: CEPIS, 2005.....	28
Figura 6. Sistemas rígidos de almacenamiento. (a) Tanque de ferrocemento; (b) Cisterna metálica; (c) Tanque de polietileno.....	33
Figura 7. Sistema flexible de almacenamiento: cisterna revestida con geomembrana.....	33
Figura 8. Sistemas modulares almacenamiento de agua. (a) Aquacell; b) Waterwall; c) H <sub>2</sub> OG; d) Depósito Hércules. ....	33
Figura 9. Reservorio dique – represa con revestimiento. ....	35
Figura 10. Reservorio excavado. ....	36
Figura 11. Reservorio estanque con revestimiento.....	36
Figura 12. Depósito metálico abierto. Fuente: metálicas BMM S.A.....	37
Figura 13. Instalación de un depósito metálico. (a) Preparación de la base de hormigón; (b) Montaje de las paredes del depósito; c) Colación de la bolsa de geotextil; d) Montaje final con la lona de PVC.. ....	37
Figura 14. Depósitos flexibles circulares: (a) depósito flexible con malla de acero galvanizada y paneles; (b) depósito flexible con malla de acero reforzada. ....	39
Figura 15. Instalación de depósitos flexibles con paneles. (a) Armado del depósito flexible con malla de acero galvanizada; (b) Levantado de las paredes; (c) Ensamblado de la estructura con los paneles. ....	39

### Capítulo 3

Fig. 1 Localización del área de estudio.....	61
Figura 2. Mapa de escurrimiento superficial.....	67
Figura 3. Mapa de números de curva por unidad de suelo y tipo de vegetación.....	68
Figura 4. Aptitud territorial para SCALL contra incendios forestales.....	69

### Capítulo 4

Fig. 1 Localización del área de estudio.....	80
Figura 2. Red de SCALL para control de incendios forestales en la zona de estudio.....	96

**CAPÍTULO 1.**  
**INTRODUCCIÓN GENERAL**

## INTRODUCCIÓN GENERAL

Los incendios forestales originados por rayos y otras causas naturales son un factor ecológico que ha influenciado la evolución de ecosistemas y el desarrollo de muchas de sus funciones. Para el ser humano, desde tiempos antiguos, el fuego ha constituido una herramienta importante en el desarrollo de sus actividades cotidianas; sin embargo, hoy en día este uso se practica de manera irresponsable en los ambientes naturales, de ahí que la mayor parte de los incendios forestales sean provocados (Rodríguez *et al.*, 2000). En años recientes, este fenómeno ha atraído la atención del gobierno y especialistas, debido al incremento notable en su ocurrencia así como por los efectos indirectos que produce: aumento del bióxido de carbono en la atmósfera, debilitamiento de bosques, pérdida de los suelos (Lozano *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008) y la amenaza a la vida e integridad de las personas así como de la fauna.

Igual que otros países, México se ha visto impactado por este fenómeno; cada año, en promedio, se presentan 10 521 incendios forestales afectando unas 292 701 ha (SEMARNAT, 2012). Así por ejemplo, durante el periodo 2004 - 2011, los estados de Coahuila, Oaxaca, Chiapas, Chihuahua, Durango, Baja California Norte, Jalisco, Quintana Roo, Guerrero, Michoacán, Sonora, Zacatecas y México han sido los de mayor superficie afectada. El estado de México es el que ha presentado el mayor número de incendios forestales, con 27 318 que afectaron importantes ecosistemas de pastizales, arbustos, matorrales así como reforestaciones y arbolado adulto. De acuerdo con la Promotora de Bosques del estado de México (2011), son cinco las zonas de alto riesgo en la entidad en materia de incendios forestales: la zona norte del estado, la zona sur, la zona del nevado de Toluca, la zona de la mariposa monarca y la zona del Izta-Popo o zona oriente. En esta última, Ixtapaluca, Amecameca, Tlalmanalco y Chalco son los municipios que históricamente han sufrido los mayores impactos, en términos de superficie afectada y número de incendios.

La infraestructura para el combate de incendios forestales en México consiste en lo siguiente: 10 000 hombres, entre personal oficial de la CONAFOR, varias otras dependencias estatales y voluntarios expertos con equipo y vehículos (UACH – CONAFOR, 2011); equipo aéreo para el combate de incendios forestales y helicópteros adaptados con baldes de agua del Ejército Mexicano. Recientemente, debido al incremento en incendios y megaincendios el uso de las

aeronaves es un apoyo indispensable para atender incendios de gran magnitud e intensidad con acceso restringido.

En el estado de México, durante la temporada de incendios, se integra un número importante de brigadas; que varían de 42, al inicio de la temporada de incendios, hasta más de 100, en los meses con mayor número de eventos. Las brigadas se integran con personal de diversas dependencias a los tres niveles de gobierno, comunidades y organizaciones civiles. Asimismo, el Gobierno del estado de México cuenta con un helicóptero Agusta 119 tipo Koala (PROBOSQUE, 2007) y en los meses de marzo y abril la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) contrata un helicóptero Bell 205 o un Bell 212.

Una de las limitantes para el uso de las aeronaves consiste en la disponibilidad de sitios para abastecerse de agua en áreas cercanas a los incendios, requiriéndose en ocasiones varias horas para que el helicóptero se abastezca de agua y regrese al área del incendio; así, el factor tiempo y la lejanía de las fuentes de agua reducen inciden en la eficiencia del uso la aeronave.

Con base en la problemática anterior, se requiere implementar una estrategia para el abastecimiento oportuno de agua a los helicópteros que considere la eficiencia de la aeronave, las limitaciones del territorio, la ocurrencia de incendios, las variables hídricas, el conocimiento local y el conocimiento experto sobre el control de incendios forestales. La estrategia se definirá para los municipios con mayor incidencia de incendios en el oriente del estado de México, Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca.

Los Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia (SCALL) son innovaciones tecnológicas para hacer frente a la escasez de agua bajo diferentes escenarios. Se utilizará la metodología propuesta por el CIDECALLI – COLPOS (Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento de Agua de lluvia - Colegio de Postgraduados) adaptándola para el abastecimiento de agua de aeronaves destinadas al control de incendios forestales en el área propuesta, a partir de la generación de un modelo de aptitud territorial basado en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para determinar la mejor ubicación de los SCALL y su diseño más conveniente en el área de estudio.



## **CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA**

## 1. REVISIÓN DE LITERATURA

### 1.1. Situación de los incendios forestales en México

La riqueza forestal de muchos países en el mundo, incluido México, se encuentra en serio riesgo a causa de diversos fenómenos; en este sentido, a nivel mundial durante el periodo de 1990 a 2000 se perdieron anualmente cerca de 9 millones de hectáreas de bosques; es decir, a una tasa del 0.2 por ciento (FAO, 2005) y con ellos, muchos de los servicios ambientales y valiosos recursos de gran importancia socioeconómica.

Los factores que inciden en la pérdida de los bosques y los recursos naturales intrínsecos son complejos; no obstante, se reconocen como los principales a los siguientes: el cambio de tierras forestales a otros usos (agrícolas, ganaderos o urbanos), la extracción tanto legal como ilícita de productos forestales (maderables y no maderables), los incendios (propiamente la alteración de los regímenes del fuego), las plagas y las enfermedades en bosques (Matthews *et al.*, 2000; PNUMA, 2003).

Los incendios forestales originados causas naturales, son un elemento externo necesario en la evolución de los ecosistemas y en muchas de sus funciones (Rodríguez *et al.*, 2000; Villiers, 2006). Sin embargo, el ser humano emplea cada vez más el fuego de manera irresponsable en los bosques y actualmente, la mayor parte de los incendios forestales son causados y se presentan con frecuencia en nuevas zonas, e incluso, han desaparecido en áreas que tenían regímenes periódicos de fuego. La magnitud de los incendios, en los últimos años, ha crecido de manera tal que tienen un efecto directo sobre el aumento del bióxido de carbono en la atmósfera, la erosión del suelo (Laurence, 2003; Lozano *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008), la debilidad del arbolado y la amenaza a la vida e integridad de las personas así como de la fauna.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación (FAO) (2007), tan sólo un grupo de diez países reúne el 80% de los bosques primarios del mundo, dentro este grupo se encuentra México, que también forma parte del grupo de países (Indonesia, Papúa Nueva Guinea y Brasil) que experimentaron las mayores pérdidas de bosques primarios entre 2000 y 2005; siendo una de las principales causas los incendios forestales.

Varios países han reportado un aumento en el número de incendios y de la superficie afectada (FAO, 2007); además, se prevé que los bosques se verán más afectados con los incendios

forestales (Herawati y Santoso, 2011). Asimismo, se menciona que debido al cambio climático los incendios se manifestarán en un ciclo de variaciones espectaculares de un año a otro; esta variabilidad será un desafío para la operación de los organismos encargados del control de incendios forestales en cuanto a la asignación de presupuestos y recursos humanos, ya que se desconoce cuál será la ocurrencia y gravedad de los incendios. En consecuencia, los programas destinados a prevenir incendios serán más complejos y costosos (FAO, 2007; Seijo, 2009).

Numerosos autores destacan el impacto negativo que las políticas públicas de prevención y control tienen sobre los incendios forestales y las tierras agrícolas, que por un lado, prohíben las quemas antropogénicas y suprimen las naturales a toda costa, y por el otro, fomentan las reforestaciones intensivas con una o dos especies descomponiendo la estructura del ecosistema. La intervención del estado en este sentido ha generado, en muchos casos, el abandono de las tierras agrícolas y forestales así como la consecuente acumulación de combustible y la ocurrencia de los llamados megaincendios por la ausencia de las prácticas de manejo (Donovan y Brown, 2007; Pyne, 2007; Seijo, 2009).

El número de incendios forestales en México durante el periodo 1996 - 2004, registró 10 279 en promedio por año. La superficie afectada, para el mismo periodo, fue de 269 129 ha en promedio por año, afectando pastizales, matorrales y vegetación arbustiva, mientras que el arbolado en ningún año superó el 27% de la superficie incendiada (SEMARNAT, 2005). Cabe añadir que en 1998 se presentaron un total de 16 443 incendios en una superficie 849 632 ha, considerándose el año más trágico por el número de vidas que se perdieron.

La Figura 1 muestra que el año 2011 fue el más crítico del periodo 2005 – 2011, con una superficie siniestrada de 956 405 ha (en donde el complejo de dos megaincendios que afectaron 315 000 ha en el estado de Coahuila tuvo una importante contribución), la cual es mayor que la superficie del año 1998 (CONAFOR, 2011). Sin embargo, el número de conflagraciones en 2011 fueron 14 124, cifra menor que la del año 1998 con 16 443 (Fig. 2).

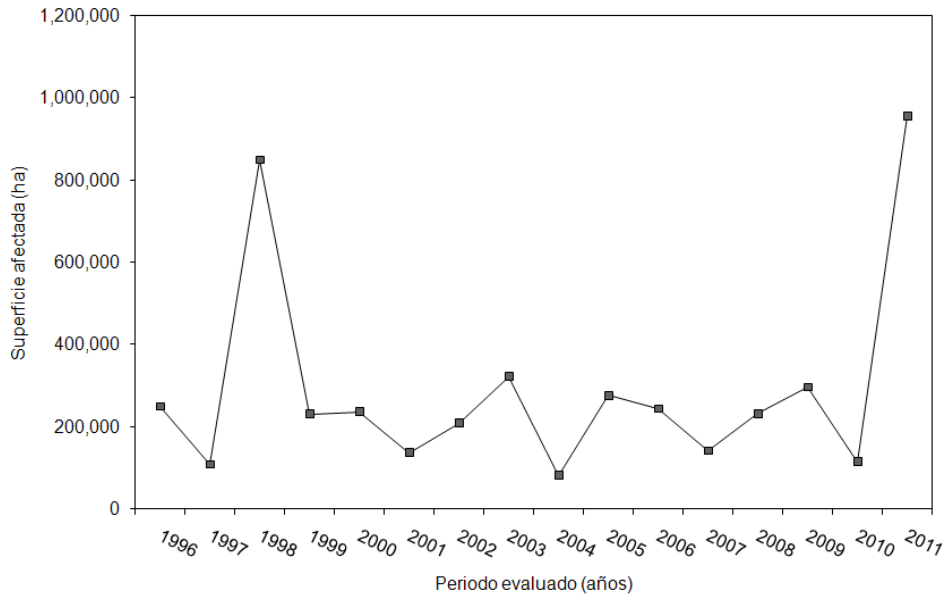


Figura 1. Superficie afectada por incendios forestales en el periodo 1996 – 2011 en México. Fuente: CONAFOR, 2011.

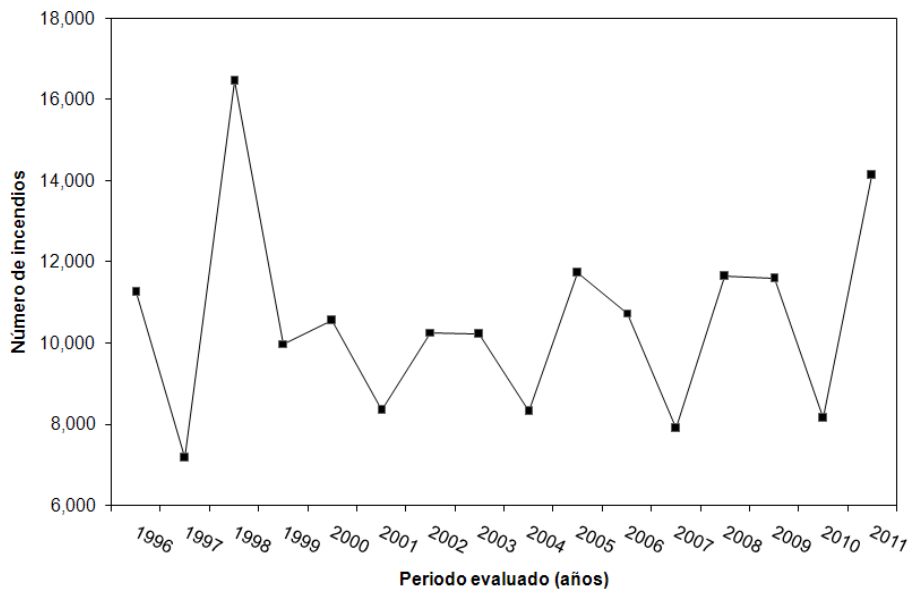


Figura 2. Número de incendios forestales en el periodo 1996 – 2011 en México. Fuente: CONAFOR, 2011.

SEMARNAT (2011) indica que en promedio se registran 10 521 incendios en el país, afectando aproximadamente 292 701 ha. Siendo el máximo número de incendios el de 1998 con 16 443 incendios en 849 632 ha. El mínimo de incendios registrados corresponde al año 1959,

con 759 en 23 000 ha. Si bien las cifras anteriores estén subestimadas pues en ese entonces no se disponía de un registro completo y no existían mecanismos para detectar los incendios.

## **1.2. Situación de los incendios forestales en el estado de México**

La Promotora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE, 2011) reporta para el periodo 1996 – 2011 número de incendios acumulados de 27 318, siendo el estado con mayor número de incendios a nivel nacional para dicho periodo. De acuerdo con la superficie promedio afectada por incendios durante el mismo periodo, a nivel nacional el estado de México ocupa el treceavo lugar con una superficie afectada de 7 000 ha (CONAFOR, 2011). Se indica también que en los años de 1998 y 2011 se presentaron las mayores superficies incendiadas con 25 847 y 9284 ha incendiadas, respectivamente.

PROBOSQUE (2011) menciona que por el tiempo de respuesta en la detección y control de incendios forestales los números del estado de México son los siguientes: a) Tiempo de respuesta de 8 minutos ocupando el segundo lugar a nivel nacional, sólo superado el Distrito Federal, con un tiempo de respuesta de 5 minutos; b) Tiempo promedio de llegada de los combatientes en 32 minutos; c) Duración del combate de incendios de 2 horas y 46 minutos. En los incisos b) y c) la media nacional es de 1 hora con 55 minutos y 10 horas, respectivamente.

La mayoría de los incendios en el estado de México se presentan en los meses de marzo, abril y mayo, afectando principalmente pastizales y arbolado, aunque no necesariamente con efectos negativos importantes en éste último (PROBOSQUE, 2011).

### **1.2.1. Los incendios forestales en la zona oriente del estado de México**

PROBOSQUE divide al estado de México en ocho regiones forestales. La región III incluye 26 municipios: Amecameca, Atlautla, Ayapango, Chalco, Cocotitlán, Ecatingo, Juchitepec, Temamatla, Tenango del Aire, Tepetlixpa, Tlalmanalco, Valle de Chalco Solidaridad, Chicoloapan, Ozumba, Chimalhuacán, Ixtapaluca, La Paz, Ecatepec, Netzahualcóyotl, Atenco, Chiautla, Chiconcuac, Papalotla, Tepetlaoxtoc, Texcoco y Coacalco. Las áreas de bosque templado se localizan en las laderas del Popocatepetl e Iztaccíhuatl, en los municipios de Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatingo y en la sierra Nevada en los municipios de Chalco, Ixtapaluca, Texcoco y Tepetlaoxtoc; en todas estas se presenta como un problema

permanente la tala clandestina. El bosque limita con áreas de pastizales, ganadería extensiva y agricultura. La vegetación de matorral crasicaule se localiza al norte del municipio de Tepetlaoxtoc; hacia el noreste se encuentran pastizales inducidos en algunas zonas de Ecatepec, Coacalco, Chalco, Tenango del Aire y Juchitepec; pastizal halófilo y tulares en las áreas de inundación en Texcoco, Atenco, Chimalhuacán y Netzahualcóyotl; pradera de alta montaña, a partir de los 3900 msnm, en Tlalmanalco, Amecameca, Ozumba y Ecatingo.

El Gobierno del Estado de México (2005) reporta que en esta región se encuentran Áreas Naturales Protegidas federales y estatales, entre las primeras se encuentran: el Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, el Parque Nacional Zoquiapan y Anexas y el Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. Los parques estatales son: el Parque San José de Chalco, Parque Ing. Gerardo Cruickshank García, Parque Sierra de Guadalupe, Parque Sierra de Patlachique, Parque Cerro Gordo, Parque Ecológico Turístico y Recreativo Sierra Hermosa, entre otros (Gobierno del estado de México, 2005).

Los incendios forestales en la zona oriente del estado de México son un problema recurrente debido entre otras causas a las quemas por actividades agrícolas, pecuarias, fogatas producto de actividades turísticas, clandestinaje forestal y presión para cambio de uso forestal a uso urbano.

Los incendios reportados en los años 1993, 1994 y 1995 fueron 268 en el primero, 187 en el segundo y 260 en el tercero, con 1 858.6, 1 197 y 2 212 ha siniestradas, respectivamente. El año 1991, en cuanto a superficie incendiada, ha sido el más crítico en los últimos 18 años pues se reportaron 241 incendios que afectaron una superficie de 3339.8 ha. El año de 1998 ha sido el de mayor número de incendios con 435, afectando 2814 ha (Hernández, 2009).

PROBOSQUE (2011), ha determinado cinco zonas de alto riesgo en incendios forestales, una de ellas es la Zona Oriente, en donde se destacan los municipios de Ixtapaluca, Amecameca, Chalco y Tlalmanalco que históricamente han presentado el mayor número de incendios (Fernández y Montaña, 2009; González, 2011). En el periodo 2005 – 2010, el municipio de Ixtapaluca fue el de mayor superficie afectada con 1645.5 ha, seguido por Amecameca con 791.5, Tlalmanalco con 784 y Chalco con 661.5 ha. En relación al número de incendios, para este periodo se observó una misma tendencia, Ixtapaluca presentó 449, Amecameca 168, Chalco 108 y Tlalmanalco 93 incendios.

Los incendios se presentan principalmente en el periodo de estiaje debido a la sequía, la preparación de las tierras para la agricultura y las quemas para provocar el rebrote de los pastizales. Por lo cual, previo al inicio de la temporada de estiaje, las brigadas de CONAFOR y PROBOSQUE, se preparan para atender los incendios forestales que pudieran presentarse (PROBOSQUE, 2011).

### **1.2.2 El combate de los incendios forestales en el estado de México**

Los incendios forestales en el estado de México se combaten a través de brigadas, cada una integrada por al menos ocho personas, en las que participan personal de diferentes dependencias gubernamentales (federal, estatal y municipal) y productores locales. El número de brigadas que se integran anualmente para el combate de incendios es variable y depende del número de incendios, intensidad y disponibilidad de gente; el mayor número de brigadas que se han formado es de 117. El número de brigadas se incrementa conforme transcurre la temporada de estiaje, por ejemplo, en el primer trimestre de 2011 se integraron 42 brigadas, de las cuales 14 eran de PROBOSQUE, 10 de CONAFOR, 13 municipales y tres brigadas de voluntarios con experiencia, integrada por productores de Texcoco y de las comunidades de Tlacotepec y Cacalomacán, (Carmona, 2011). Eventualmente, se suman brigadas de organizaciones no gubernamentales así como de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (PROBOSQUE, 2011).

Se debe destacar que el trabajo del combatiente de incendios forestales es peligroso, arduo y poco reconocido por la sociedad a pesar del gran servicio que prestan a la conservación del patrimonio natural. Sus actividades demandan de una gran aptitud física, capacitación, experiencia y sentido común (Rodríguez *et al.*, 2006).

El estado de México cuenta con infraestructura para las labores de vigilancia como son: 16 torres de vigilancia, equipos de radio comunicación y un helicóptero Agusta 119 tipo Koala con un tanque con 1200 L de capacidad (PROBOSQUE, 2007). También se cuenta con un carro bomba equipado con un tanque de agua con capacidad de aproximadamente 1520 L y una celda de 76 L para espuma retardante. La CONAFOR, anualmente, licita la contratación de un helicóptero Bell 205 o un Bell 212 durante los meses de marzo y abril, con la finalidad de apoyar

la extinción de los incendios (Moreno, 2011)<sup>1</sup>Comunicación personal. El apoyo de esta infraestructura permite detectar los incendios forestales en el período crítico y combatirlos de manera eficiente.

### 1.2.3 El combate de incendios con el empleo de helicóptero

Los helicópteros apoyan a las brigadas de incendios cuando las superficies forestales afectadas son de 5 ha o se presentan en áreas naturales protegidas. El helicóptero Agusta 119 puede operar con ocho pasajeros a bordo y cargas colgantes de hasta 2720 kg, su autonomía de vuelo es tres horas con 50 minutos, alcanzado velocidades de  $260 \text{ kmh}^{-1}$  (FAASA, 2011); considerando que se destina al combate de incendios, está equipado con un helitanque cuya capacidad es de 1 200 L de agua, el cual cuenta con una manguera de tres metros de largo y una bomba. Así, el helicóptero realiza vuelos estacionarios sobre el depósito de agua para abastecerse del vital líquido en un tiempo de 54 minutos, para luego rociarla desde el aire (PROBOSQUE, 2011).

Durante los meses de marzo y abril, la CONAFOR en el estado de México, renta un helicóptero Bell 205 o un Bell 212 (Fig. 3), por un periodo de 7 horas diarias a un costo aproximado de \$ 45 000.00/hora vuelo.

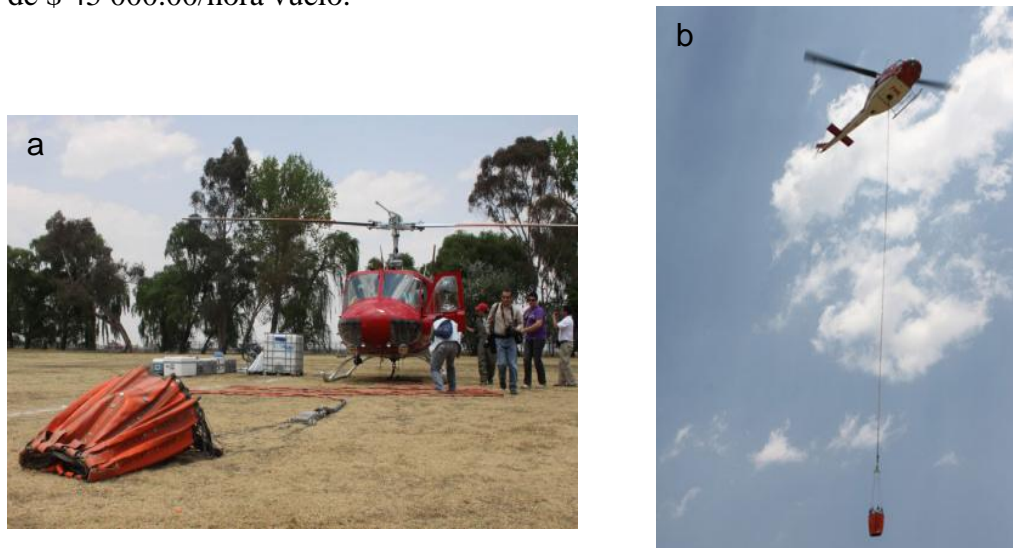


Figura 3. Helicóptero Bell. (a) Helicóptero Bell con Bambi Bucket ®; (b) Helicóptero Bell en operación.

Fuente: CONAFOR, 2009.

<sup>1</sup> Félix Moreno Pichardo. Coordinador Aéreo. CONAFOR, Estado de México. Km. 43.5, Carretera México Toluca, Campamento Forestal. Ocoyoacac, Estado de México. Tel. 01 728 28 23 456.



El Bell 205 puede operar con 12 pasajeros y una carga colgante de 2000 kg, su autonomía de vuelo es de 2 horas o de 360 km, alcanzando velocidades de  $205 \text{ kmh}^{-1}$  (Flight Service, 2009); está equipado con un Bambi Bucket® que puede transportar 1200 L de agua. El Bell 212 cuenta con dos turbinas, mientras que el 205 posee solo una, y puede operar con 13 pasajeros y un Bambi Bucket® con capacidad de 1200 L de agua, aunque puede transportar cargas de 2268 kg; su autonomía de vuelo es de 2 horas con 20 minutos y alcanza velocidades de  $231 \text{ kmh}^{-1}$  (Aviheco, 2011).

Es importante destacar el papel de los helicópteros tanto en las temporadas de incendios más álgidas, en los años 1998, 2001 y 2011, como en casi todo año en que alguna zona del país presenta elevadas incidencias de incendios; por ejemplo, durante el complejo de dos grandes incendios ocurridos en Coahuila durante el año 2011, que afectó 316 954 ha, los helicópteros cumplieron las siguientes funciones: plataforma de evaluación y estrategia, ataque directo mediante descargas de agua y retardante, transporte de personal de los campamentos a los sectores activos, transporte de alimentos, transporte de heridos, vuelos de reconocimiento y de detección y vuelos para tomadores de decisiones de alto nivel. Durante esta conflagración, se utilizaron 23 helicópteros de distintos tipos (CONAFOR, 2011).

#### **1.2.4 Las necesidades de agua en el combate de incendios**

Para el abastecimiento de agua de los helicópteros durante el combate de incendios existen lagunas y presas permanentes como la Presa de Villa Victoria, Presa de Valle de Bravo, Presa Guadalupe, Presa Madín, Presa Alzate, Presa de Salazar y Presa Iturbide. Cuando no existen cuerpos de agua cercanos se dispone de un tanque portable con capacidad de 10 000 L de agua. El uso de este último es el que predomina, pues en raras ocasiones se dispone de un reservorio de agua cercano. A causa de lo anterior, el agua se debe transportar con pipas desde la población más cercana hasta el tanque armado, lo anterior tiene grandes implicaciones a nivel de tiempo y eficiencia del helicóptero, que se resolverían si se contaran con fuentes de abastecimiento de agua permanentes en ubicaciones estratégicas.

En la actualidad el control aéreo de incendios forestales no tiene el impacto esperado, debido principalmente a la ausencia de fuentes de agua cercanas y de personal en tierra, cuya presencia

es necesaria en las operaciones de logística de la aeronave (llenado de tanque, combustible, radiocomunicación y el armado del tanque portable).

El trabajo del helicóptero es complementario en el combate del incendio, pues la aeronave sola no podría apagar el incendio, su función consisten en arrojar agua a la línea de fuego a fin reducir su intensidad y el largo de las llamas de manera que las brigadas en tierra puedan abatirlo de forma directa. Además, se tienen altos costos de operación en el combate aéreo por concepto del pago del piloto de origen estadounidense, la contratación de un traductor y las horas vuelo de la aeronave. Debido a los puntos anteriores, se hace necesario mejorar la eficiencia del combate aéreo, principalmente el acceso a fuentes de agua a fin de proveer la ayuda requerida a las brigadas en tierra y reducir los impactos de un incendio forestal.

Con base en lo mencionado anteriormente, el combate aéreo de incendios forestales está cobrando cada vez más importancia y en un corto plazo demandará de una oferta suficiente de agua que permita suprimir incendios de grandes dimensiones. La falta de un adecuado abastecimiento de agua no sólo limita el uso del helicóptero, sino también el empleo de mochilas aspersoras (depósitos de 19 L de capacidad que se carga como una mochila con mangueras integradas y dos tipos de boquillas), las cuales contienen agua y un agente retardante que se aplica sobre los combustibles forestales y que representa una herramienta de gran utilidad para reducir el tiempo de combate. Sin embargo, la ausencia de fuentes cercanas a los caminos o al incendio limita su uso pues el recorrer grandes distancias implica pérdida de tiempo y energía para los combatientes.

### **1.3. Los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL) y el abastecimiento de agua**

#### **1.3.1. Antecedentes de los SCALL**

La captación de agua de lluvia describe a todos los métodos para concentrar, almacenar y coleccionar el escurrimiento proveniente del agua de lluvia, para uso doméstico y agrícola (De Winnaar *et al.*, 2007). Este escurrimiento puede dirigirse al área de cultivo, donde es almacenado en el perfil del suelo para su empleo inmediato (sistemas de cultivo de escorrentía) o almacenada

en depósitos de agua para futuros usos (doméstico, abrevaje del ganado, riego o acuacultura) (FAO, 2003).

Los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL), que engloban a los métodos antes descritos, se han utilizado a través de la historia por diferentes civilizaciones; empero, fueron casi olvidados en la era de la alta urbanización (Burkhard *et al.*, 2000). Hoy en día, dada la incapacidad para suministrar el recurso agua a las inmensas poblaciones a través de los esquemas convencionales, los SCALL están experimentando un renacimiento, de ahí que su empleo sea cada vez más frecuente en desarrollos de toda índole.

El uso de los SCALL se remonta a tiempos muy antiguos; se sabe por ejemplo, que en los años 8000 a 400 a.C. en el oriente del actual Jericó, los habitantes practicaban el manejo de escurrimientos pluviales, los cuales a pesar de ser escasos, permitían el cultivo del trigo y la cebada; así también, en el continente Europeo, esta práctica fue por vez primera instrumentada en el imperio Romano, mediante el uso de presas de tierra y de mampostería para almacenar el escurrimiento superficial (Anaya, 2010).

### **1.3.2. Usos actuales de los SCALL**

En la actualidad, es posible encontrar experiencias sobre el uso de SCALL en los países africanos donde el agua de lluvia se utiliza fundamentalmente para el consumo humano y actividades agrícolas (Schiettecatte *et al.*, 2005); en la India y China conservan a los SCALL como una práctica milenaria que ha probado su bondad, por lo que es ampliamente usada en zonas rurales (Oweis y Hachum, 2006).

En América latina, países como Brasil, Honduras, Nicaragua, Guatemala y México han promovido a los SCALL como una herramienta valiosa en el abasto de agua en calidad y cantidad para diversos fines, pero principalmente para el consumo humano tanto en zonas rurales como urbanas.

México tiene una larga tradición en el diseño de tecnología autóctona y tradicional sobre sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia, la cual se han empleado en la producción agrícola y el uso doméstico (Palerm, 2002); estos SCALL pueden ser técnicamente simples y temporales, como son colocar cercas de ramas sobre el curso de un arroyo seco para desviar las avenidas de aguas e introducirla a las parcelas, hasta complejos y permanentes, como

el control de inundaciones para el entarquinamiento mediante cajas de agua y cultivar con la humedad residual o el control y conducción de escorrentía para su almacenamiento en los pequeños reservorios conocidos como *jagüeyes* (Galindo, 2008).

Galindo *et al.* (2008) indican que en México el principal uso que se da al agua almacenada dentro de los *jagüeyes* u ollas de captación es para abrevadero a fin de que el ganado, sobre todo para ganado menor (ovejas y cabras) y ocasionalmente burros, caballos y vacas dispongan de este líquido durante la temporada de sequía. En situaciones especiales, como es el caso de las rancherías, viviendas aisladas que no cuentan con agua entubada o localidades donde el suministro es deficiente, el agua de los *jagüeyes* se usa en los quehaceres domésticos.

En Reino Unido, el uso del agua de lluvia para el sector agropecuario es variado, se destina a la ganadería, la producción de cultivos a cielo abierto, la agricultura protegida, la agroindustria y las granjas diversificadas. Cada subsector mencionado emplea el agua de lluvia en actividades múltiples, desde la irrigación hasta el lavado de equipos y materiales de uso cotidiano (United Kingdom Environment Agency, 2009).

En áreas forestales, las tinajas ciegas constituyen la estrategia mejor conocida para retener el agua de lluvia, evitar su escurrimiento superficial y permitir que esta agua penetre al suelo; esta es una forma viable de mantener la humedad en el subsuelo y reducir la sequía de la vegetación, previniendo o atenuando los incendios forestales. Otras prácticas que favorecen el almacenamiento del agua en zonas forestales son: las terrazas de formación sucesiva, terrazas individuales o zanjas bordos (CONAFOR, 2004).

Cuando se trata de plantaciones forestales, la captación de agua de lluvia es un medio para proveer agua de manera estacional o permanente, aunque en la mayoría de los casos la propuesta técnica consiste en una variante empleada por cientos de años en zonas áridas agrícolas y frutícolas (cajetes, microcaptaciones o manejo de espaciamiento) (FAO, 1989); en otros casos, se recurre a sistemas modernos para captarla y almacenarla. De esta forma, la captación de agua de lluvia involucra dos componentes principales: un área de captación y una pequeña área de almacenamiento, que puede ser el mismo suelo donde las plantas o árboles crecen, pequeños tanques o estructuras acondicionadas.

Respecto del agua de lluvia para consumo humano, los Estados Unidos de América son el ejemplo más tangible y moderno de los SCALL, como se puede notar en las Islas

Vírgenes, donde la captación de agua de lluvia es una obligación con carácter legal debido a la escasez del recurso en el territorio (UNEP, 1997).

Hawái es otro de los estados de la Unión Americana con un gran número de personas dependientes del agua de lluvia, entre 30 000 y 60 000; aunque a diferencia de las Islas Vírgenes, no existe una regulación al respecto. Es importante mencionar que los SCALL de Hawái se destacan por un uso paralelo al consumo humano, el control de incendios en casa – habitación, en tal sentido, se calcula que para apagar un incendio en una superficie de 1200 ft<sup>2</sup> (aproximadamente 110.4 m<sup>2</sup>) se requieren 2750 gal (10 395 L); lo anterior tiene, desde luego, implicaciones sobre el diseño convencional de los SCALL pues se deben de considerar aspectos como la accesibilidad y ubicación estratégica de la toma de agua para facilitar su conexión al carro – bomba, así como la resistencia a altas temperaturas del sistema de almacenamiento, por mencionar algunas. A pesar de las ventajas visibles de este particular uso del agua de lluvia, el sistema se aplica sólo en algunas comunidades del estado y aun es motivo de controversia (Macomber, 2010).

Hoy en día y a pesar de la diversidad de sistemas de captación de agua de lluvia, no se puede afirmar que se hayan explorado todas las posibilidades de uso; por ejemplo, en la literatura no se mencionan propuestas específicas que involucren el empleo de esta tecnología en el combate de incendios forestales; por el contrario, de forma recurrente sucede que las obras de captación de agua de lluvia destinadas al consumo humano o animal son aprovechadas también para este propósito, sin que representen una opción factible pues no ofrecen las condiciones óptimas para la actividad.

### **1.3.3. Componentes de un SCALL**

Existen varias propuestas para el diseño de los SCALL, como la que describe el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) (2001) o el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2008), por mencionar las más relevantes. Sin embargo, la propuesta de diseño se restringe a la captación del agua de lluvia en casas – habitación, edificios o al uso agrícola.

El CIDECALLI -COLPOS (Centro Internacional de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia – Colegio de Postgraduados) propone para el diseño de los SCALL un esquema

integral y aplicable en cualquier escenario (Anaya, 2011). A continuación se presentan los elementos a considerar para el diseño del SCALL

1. Localización del SCALL: para la ubicación precisa del sitio más conveniente se consideran dos aspectos, la macrolocalización y la microlocalización, a fin de definir de forma precisa la ubicación del SCALL de acuerdo al sitio más conveniente. La primera de ellas, considera al estado, región, localidad o comunidad donde se instalará en sistema. La microlocalización consiste en identificar y referenciar al SCALL mediante planos, criterios y croquis que permitan precisar el sitio específico en donde se construirá.

En algunas ocasiones, la ubicación del SCALL se encuentra predeterminada, debido a que se dispone un espacio físico puntual, como puede ser una escuela, una casa o una fábrica, en otras puede representar todo un reto (Sekar y Randhir, 2007), sobre todo cuando se aborda el problema en un contexto regional, donde se deben considerar aspectos como la variabilidad de la precipitación (Tollner *et al.*, 2004), los usos de la tierra, las características hidrológicas del área (Giráldez *et al.*, 1988) y las propias del SCALL.

2. Demanda de agua: es la cantidad de agua requerida para satisfacer la necesidad en un proyecto específico, por ejemplo, calcular la cantidad de agua que requiere una familia para satisfacer sus actividades anuales, la cantidad de agua suficiente para cubrir las necesidades de un hato ganadero o la cantidad de agua requerida para combate aéreo en incendios forestales.

El CIDECALLI propone la siguiente expresión para determinar la demanda en un SCALL convencional:

$$D_j = \frac{Nu \times Dot \times Nd_j}{1000}$$

$$D_{\text{anual}} = \sum_{j=1}^{12} D_j$$

$$J = N^\circ \text{ del mes, } J = 1$$

Donde:

$D_j$  = demanda de agua en el mes ( $m^3$ /mes/población).

$N_u$  = número de beneficiarios del sistema.

$Dot$  = dotación (L/persona/día).

$N_{dj}$  = número de días al mes  $j$ .

$D_{anual}$  = demanda de agua para la población ( $m^3$ ).

$j$  = número de mes (1, 2, 3 ... 12).

1000 = factor de conversión de litros a  $m^3$ .

La fórmula anterior ilustra el procedimiento general para determinar la demanda de agua; no obstante, el propósito del SCALL definirá algunas variantes en los cálculos; así por ejemplo, si se tratara de abastecer de agua a un sistema pecuario, la determinación de la demanda sería a partir del requerimiento diario de cada animal; si se tratara de los incendios forestales, se referiría a la cantidad de agua necesaria para hacer frente a un evento de manera eficiente y operativa.

3. Precipitación pluvial neta: se define como la cantidad de agua de lluvia que dispone el sistema (SCALL), una vez descontadas las pérdidas por factores como salpicamiento, evaporación, fricción, tamaño de gota y velocidad del viento; en este sentido, el método del CIDECALLI resume todas estas pérdidas en el concepto de "coeficiente de captación", el cual se propone del 85% (0.85). Asimismo, es importante considerar la eficiencia de captación en el cálculo, la cual depende, a su vez, del coeficiente de escurrimiento, que es la relación entre la lámina de agua precipitada sobre una superficie y la lámina de agua que escurre; dicho coeficiente posee valores que oscilan entre el 0 y 1, donde cero representa un nulo escurrimiento y 1, se refiere a que todo lo que precipita escurre. Es importante mencionar, que el coeficiente de escurrimiento es un valor que dependerá del material sobre cual precipita la lluvia.

Mediante la expresión siguiente se calcula la precipitación neta de diseño:

$$PN = P \times \eta \times C_e$$

Donde:

$PN$  = precipitación neta.

$P$  = precipitación observada o precipitación media.

$\eta$  = coeficiente de captación.

$C_e$  = coeficiente de escurrimiento.

El dato de la lluvia en la fórmula anterior, tradicionalmente se calcula con el valor promedio anual de los años de registro; sin embargo, no es muy recomendable pues se asumiría un evento hidrológico de magnitud que se presenta cada 2 años, es decir, un evento con una probabilidad del 50% de ocurrencia y del 50% de no ocurrencia; por lo anterior, Juan (2011) con base en la evaluación de la eficiencia de SCALL instalados en hogares de la Ciudad de México, sugiere que la lluvia de diseño se calcule con un periodo de retorno mayor 1.053 y menor a 2 años cuando se trate de pequeñas estructuras como casas o edificios pequeños, de otra forma, se debe recurrir a mayores valores de periodo de retorno.

4. Área efectiva de captación: se refiere a la superficie donde cae el agua de lluvia. El sitio debe contar una superficie tal, que permita captar el volumen de agua igual al estimado en la demanda, además de una pendiente que facilite el escurrimiento pluvial al sistema de conducción. Esta área varía de acuerdo a los usos y circunstancias, de manera que se pueden incluir desde techos hasta laderas revestidas o tratadas con material impermeabilizante. A continuación se indica la expresión para su cálculo:

$$A_{ec} = \frac{\text{Demanda anual}}{\sum_{j=1}^n PN}$$

Donde:

$A_{ec}$  = área efectiva de captación ( $m^2$ )

Demanda anual = demanda anual ( $m^3$ )

PN = precipitación neta (m)

$j \dots n$  = meses cuya precipitación es  $\geq 40$  mm.

La fórmula anterior es funcional cuando no se dispone de un área fija; en todo caso, cuando se dispone de tal superficie el razonamiento es distinto, pues el cálculo se dirige a determinar el



volumen de agua a captar a fin de definir la capacidad del sitio para cubrir la demanda. En seguida se propone la fórmula para el cálculo (Anaya, 2011):

$$O \text{ anual} = AD \times \sum_{j=1}^n PN$$

Donde:

O anual = oferta anual (m<sup>3</sup>)

AD = área disponible (m<sup>2</sup>)

PN = precipitación neta (m)

Cuando no se dispone de techos para captar el agua de lluvia, se recurre a una superficie o ladera que requiera las mínimas actividades de movimiento de tierra y posteriormente se recubre toda la superficie con material impermeable (plástico o geomembrana). Para realizar estas actividades, se deben obtener las características y condiciones del sitio, tales como topografía, geología, flora, historial del sitio y curvas de nivel.

La impermeabilización de laderas requiere de la nivelación y compactación del terreno; la primera, favorece el escurrimiento homogéneo y la segunda, incrementa la densidad aparente del suelo ofreciendo mayor soporte y estabilidad; posteriormente se recubre con material impermeable como el plástico o geomembrana (Juan, 2006; Anaya, 2012).

El procedimiento para instalar la geomembrana se explica a continuación (Firestone, 2008; Anaya, 2012):

a) Remoción de la vegetación en el sitio; de manera que la superficie quede lisa, libre de asperezas agresivas, de piedras o pequeñas cavidades; enseguida se aplica una compactación (con rodillo vibratorio, compactadora mecánica o manual) del suelo del 85 al 90% de acuerdo con una prueba de densidad Proctor (indica la cantidad de humedad a la cual debe encontrarse un suelo para alcanzar su máxima densidad; el esfuerzo de compactación depende de la cantidad de agua en el suelo). El terreno, para mejor acondicionamiento, puede excavarse en su base quitando piedras y vegetación, seguida de una nivelación y compactado; o bien, aportar un lecho artificial, generalmente de arena, de granulometría controlada y posterior compactado.

b) El anclaje de coronación (Fig. 4), es el más usado para sujetar la geomembrana; consiste en el enterramiento de la geomembrana en una zanja de anclaje alrededor del perímetro del área de captación con dimensiones mínimas de 0.40 m y 0.41 m, cuando la velocidad del viento es elevada, se sugiere incrementar las dimensiones de la zanja; igualmente, se debe dejar una distancia de 1 m entre la zanja y el perímetro del área de captación con una pendiente a favor de la zanja del 1%. El relleno y compactación de la geomembrana se deben hacer sin someterla a tensiones. Si la longitud de la sábana es considerable, será necesario realizar anclajes intermedios en el área de captación a fin de absorber sus movimientos.

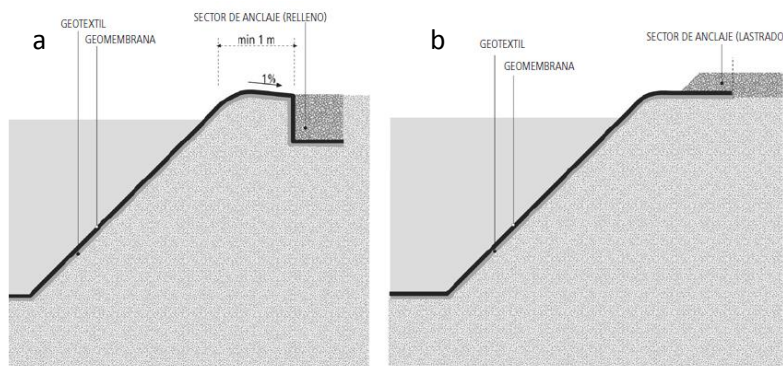


Figura 4. Sistemas de anclaje: (a) anclaje de coronación con zanja; (b) anclaje de coronación con lastrado.

c) Las sábanas de geomembrana se desenrollan desde la zanja, pendiente arriba, sujetándola al suelo de manera temporal si es necesario, para finalmente cortarla y ajustarla para introducirla a la zanja. Una vez instalada la geomembrana, se debe rellenar la zanja, compactando el suelo. Por otro lado, siempre es aconsejable colocar un geotextil (salvo que los materiales del suelo fueran arenosos o arcillosos) entre el suelo y la geomembrana, según el terreno, el gramaje del geotextil puede variar entre los 200 y 500 gr m<sup>-2</sup>; asimismo, según las condiciones locales y la arcilla en el terreno, puede requerirse de un sistema de drenaje o una doble impermeabilización con capa drenante entre las dos geomembranas. La duración de la geomembrana expuesta al clima puede ser de más de 20 años.

d) Las sábanas de geomembrana deben de reposar entre 30 y 40 minutos antes de unir las juntas; se deben eliminar las arrugas y solapar 20 cm, en tanto que la unión se efectúa de arriba a abajo en sentido de la pendiente. Para unir las sábanas (si el terreno es blando, debe colocarse una placa de madera o metal, la cual se mueve a medida que progresa la unión) se recurre a una

banda autoadhesiva o a la termofusión según sea el tipo de geomembrana. Toda unión horizontal entre las sábanas de geomembrana se debe evitar como sea posible.

e) El mantenimiento de la geomembrana consiste en una inspección anual de la instalación, para detectar cualquier problema que pudiera perjudicar la durabilidad del sistema, a través del control visual de las juntas, los solapes y los anclajes; igualmente se deberá verificar la presencia de fugas.

5. Sistema de conducción: se refiere al conjunto de canaletas o tuberías de diferentes materiales y formas que conducen el agua de lluvia del área de captación a la de almacenamiento, previo paso por el sedimentador. También se puede definir como el conjunto de conductos, accesorios y uniones utilizados para coleccionar las aguas pluviales vertidas en el área efectiva de captación, para dirigir las a los puntos de almacenamiento.

En un SCALL convencional, los caudales de agua son captados y conducidos por las canaletas para su evacuación por tuberías verticales (bajadas), que llevan el líquido hasta el colector horizontal, que se sitúa en la parte inferior del edificio o casa, donde hay un registro, filtro de control de sedimentos, sedimentador y cisterna para su almacenamiento y posterior utilización.

El proceso de diseño del sistema de colección convencional, requiere que los tramos longitudinales de las canaletas o colectores posean una pendiente del 1 y 4 %, siendo recomendable un valor medio del 2%. Además, las canaletas deben considerar un número de bajadas pertinente con un diámetro adecuado, para evitar que se sometan a un esfuerzo mayor del que se debe por el peso del agua almacenada provocando su deformación o caída.

Para establecer las dimensiones de la canaleta, se requiere determinar el gasto de esperado de agua de lluvia, el cual estará en función de la superficie o área de captación y de la intensidad de la precipitación para un periodo de retorno dado (1.1 o 2 años). Así, para obtener el caudal de conducción se recurre a la siguiente expresión:

$$Q_c = \frac{5}{18} \times I \times A_{ec}$$

Donde:

$Q_c$  = caudal de conducción ( $m^3$ ).

I = intensidad de lluvia, para un periodo de retorno dado. El CIDECALLI – CP, recomienda emplear una intensidad entre 50 a 100 mm h<sup>-1</sup>.

Aec = área efectiva de captación (m<sup>2</sup>).

5/18 = factor de conversión de m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> a L s<sup>-1</sup>.

Considerando que los registros de intensidad de lluvia no siempre están disponibles, Juan (2011) propone recurrir a las precipitaciones máximas registradas para cada año, aplicando la distribución Gumbel para encontrar el valor correspondiente a un periodo de retorno determinado. El periodo de retorno, deberá ser motivo de un análisis económico – técnico bien fundamentado, a fin de elegir la lluvia máxima que se empleará en los cálculos. Los periodos de retorno cortos (1 o 2 años), minimizan el valor de la precipitación y por tanto, las dimensiones de la canaleta; por el contrario, un periodo de retorno alto (5 o 10 años), aumentan las dimensiones en la canaleta y el costo por concepto de materiales, pues se emplean valores de precipitación superiores, pero también imprimen mayor seguridad en el sistema colector (Juan, 2011).

Actualmente, muchos de los sistemas colectores que se adquieren en el mercado, tienen una gran durabilidad (mayor de 10 años) y se presentan con diferentes secciones; sin embargo, las canaletas de metal son más versátiles a diferencia de los elaborados de PVC (policloruro de vinilo). Si bien existen ya propuestas de canaletas y dimensiones más o menos estandarizadas según las características de cada región, se recomienda emplear la siguiente fórmula para el diseño o compra:

$$Q = A \times V$$

Donde:

Q = gasto (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>).

A = área (m<sup>2</sup>).

V = velocidad (ms<sup>-1</sup>).

La velocidad se determina mediante la Ecuación de Manning:

$$v = \frac{1}{n} \times r^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

V = velocidad del caudal ( $\text{ms}^{-1}$ ).

n = coeficiente de rugosidad, que está en función del material de la canaleta (adimensional).

r = radio hidráulico (m).

s = pendiente expresada en % con respecto a 1.

Par calcular el radio hidráulico, se aplica la siguiente expresión:

$$r = \frac{A}{p}$$

Donde:

A = área ( $\text{m}^2$ )

p = perímetro de mojado (m).

El CIDECALLI, propone resolver la ecuación seleccionando dimensiones aproximadas para la canaleta que se utilizarán para obtener el valor de Q, el cual debe compararse con el valor de  $Q_c$ , con lo que es posible expresar dos condiciones: a) Si  $Q \geq Q_c$  el tamaño de la canaleta se acepta, y b) Si  $Q \leq Q_c$  el tamaño de la canaleta no es suficiente, entonces tendrá que repetirse el cálculo con una nueva propuesta del área de sección.

Es posible también, partir de velocidades promedio determinar el área de la canaleta, para ello se debe despejar la variable área y emplear los valores promedio de velocidad en la ecuación, con antelación se debe tener calculado el gasto; estas velocidades promedio son de  $0.9 \text{ ms}^{-1}$ , en pendientes de 2 a 4 %, y de  $1.2 \text{ ms}^{-1}$ , para pendientes de 4 a 6 %. Con el dato de superficie, se procede a calcular las dimensiones de la canaleta, perímetro de mojado y radio hidráulico, procurando conservar una proporción de ancho entre alto de 2 a 4; la velocidad del caudal, se determina con la ecuación de Manning; idealmente, el valor de la velocidad promedio o

propuesta debe de coincidir con la velocidad calculada; de lo contrario se debe buscar la igualdad a través de iteraciones (Oropeza, 2011).

6. Sedimentador: la sedimentación es un proceso físico que consiste en la separación, por la acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua (Anaya, 2012). Las variables de diseño son el área efectiva de captación del agua de lluvia y la máxima lluvia registrada en un día. Esta determinación se hace a partir de la fórmula siguiente:

$$\text{Vol. sedimentador} = \frac{\text{Aec} \times \text{Id}}{3}$$

Donde:

V sedimentador = volumen del sedimentador (m<sup>3</sup>).

Aec = área efectiva de captación de lluvia (m<sup>2</sup>).

Id = precipitación máxima en 24 horas (m).

Los tanques de sedimentación pueden ser de forma rectangular cuadrada o circular; es muy recomendado el empleo de tanques rectangulares de flujo horizontal operados de forma continua para facilitar las tareas de operación y mantenimiento. Por otro lado, es importante considerar el tiempo de retención del agua en el sedimentador, el cual debe de ser suficiente para permitir que los sólidos en suspensión se asienten (partículas de mayor densidad que el agua); es decir, el periodo de permanencia del agua debe superar el tiempo necesario para que una partícula camine desde la superficie (caso más desfavorable) hasta el fondo del tanque (Azevedo *et al.*, 1975).

Los sedimentadores tienen en general los siguientes componentes:

a) Zona de entrada: estructura hidráulica de transición, que permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador.

b) Zona de sedimentación: consta de un canal rectangular con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas. La dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos.

c) Zona de salida: constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones que tienen la finalidad de recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas depositadas.

d) Zona de recolección de lodos. Constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentos y una tubería y válvula para su evacuación periódica.

De acuerdo con Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS) (2005), un sedimentador (Fig. 5) de diseñarse de acuerdo con los siguientes criterios:

- El periodo de diseño es de 8 a 10 años.
- El tiempo de retención será de 2 a 6 horas.
- La carga superficial será de 2 a 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día.
- La profundidad del sedimentador será de 1.5 a 2.5 m.
- La relación de dimensiones de largo y ancho (L/B) será de 2.25:1 a 5:1.
- La relación de las dimensiones de largo y profundidad (L/H) será de 4:1 a 25:1.
- El fondo de la unidad debe tener una pendiente entre 10 – 20% para facilitar la acumulación del sedimento.
- La velocidad de los orificios comunicantes no debe ser mayor a 0.15 ms<sup>-1</sup> para no crear perturbaciones en la zona de sedimentación.
- La descarga de lodos se debe de ubicar en el primer tercio de la unidad; el 80% del volumen de los lodos se deposita en esa zona y se debe determinar el volumen máximo que se va a producir.
- El caudal por metro lineal de recolección en la zona de salida debe de ser igual o inferior a 3 Ls<sup>-1</sup>.
- La pantalla difusora debe estar entre 0.7 y 1 m de distancia de la pared de entrada (espacio para la entrada de personas).

- Los orificios más altos de la pared difusora deben estar a 1/5 o 1/6 de la altura (H) a partir de la superficie del agua y los más bajos entre 1/4 o 1/5 de la altura (H) a partir de la superficie del fondo.

El análisis del comportamiento de los sedimentadores convencionales de flujo horizontal revela que la eficiencia del proceso depende esencialmente de factores críticos de diseño, a saber:

a) Tasa de flujo superficial.

Para los sedimentadores de flujo horizontal como en los de flujo vertical que funcionan con partículas discretas sin turbulencias, las condiciones límites de diseño están dadas por la siguiente relación:

$$V_s = \frac{Q}{A_s}$$

Donde:

$V_s$  = velocidad de sedimentación ( $m\ s^{-1}$ ).

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3\ s^{-1}$ ).

$A_s$  = área superficial del sedimentador ( $m^2$ ).

Al respecto vale la pena mencionar que los flósculos de sulfato de aluminio generalmente se sedimentan con una velocidad entre 0.015 y 0.070  $cm\ s^{-1}$ ; asimismo, una tasa de flujo superficial debe oscilar entre 13 y 60  $m^3 / m^2 / día$ .



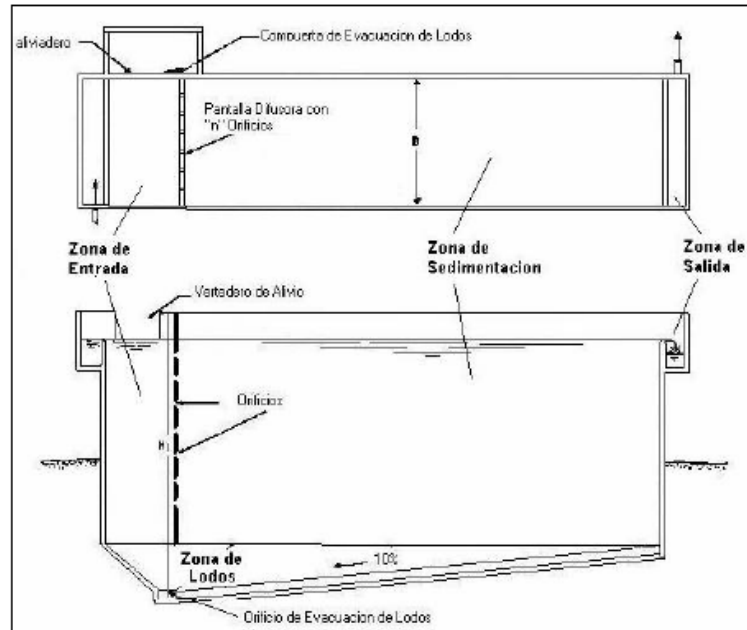


Figura 5. Sedimentador en planta y corte longitudinal. Fuente: CEPIS, 2005.

b) Forma de los tanques y relación de dimensiones. En los sedimentadores rectangulares el flujo entra por una de las extremidades y sale por la otra; las dimensiones de largo (L), ancho (B) y altura (H) deben guardar relaciones convenientes para reducir los efectos de corrientes nocivas y para mejorar las condiciones de flujo (líneas de flujo). Considerando el espaciamiento entre la entrada y la cortina o pared de distribución de flujo. La altura máxima (H') se podrá calcular considerando una pendiente del 10% del fondo de la unidad y aplicando la siguiente expresión:

$$H' = H + 0.1H$$

Donde:

$H'$  = altura máxima (m).

H = altura (m).

0.1 = 10% de la profundidad añadida para el espacio de acumulación de lodos.

La altura del agua sobre el vertedero de salida, con longitud de cresta igual al ancho de la unidad, se determina con la siguiente expresión, su resultado se sumará a la altura máxima calculada en la fórmula anterior:

$$H_2 = \frac{Q}{1.84 \times B}^{\frac{2}{3}}$$

Donde:

$H_2$  = altura del agua sobre el vertedero (m).

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3/s$ ).

$B$  = ancho (m).

c) Velocidad horizontal de flujo. Se propone la siguiente expresión para el cálculo:

$$V_H = \frac{100 \times Q}{B \times H}$$

Donde:

$V_H$  = velocidad horizontal ( $cms^{-1}$ ).

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3 s^{-1}$ ).

$B$  = ancho (m).

$H$  = altura (m).

100 = factor de conversión de metros a centímetros.

La velocidad longitudinal del agua en los sedimentadores puede interferir con el proceso de sedimentación y puede causar el arrastre de las partículas ya sedimentadas. Las velocidades elevadas corresponden a números de Reynolds más altos, que caracterizan una mayor turbulencia. En la práctica la velocidad de flujo se limita el valor de la velocidad horizontal a  $1.0 \text{ cm s}^{-1}$  y como máximo a  $1.5 \text{ cm s}^{-1}$ .

d) Tiempo de retención. A partir de la siguiente expresión se puede calcular el tiempo de retención:

$$T_o = \frac{A_s \times H}{3600 \times Q}$$

Donde:

$T_o$  = tiempo (h).

$A_s$  = área superficial del sedimentador ( $m^2$ ).

$H$  = altura (m).

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3 s^{-1}$ ).

La eficiencia de los sedimentadores que funcionan con partículas minerales discretas, no depende de la profundidad. Generalmente, ésta es superior a 2.50 m y normalmente no excede de 5.00 m. Desde el punto de vista estructural las profundidades de 4.00 a 4.50 m son ventajosas.

e) Número de orificios. Para tal fin se proponen las dos expresiones siguientes:

$$A_o = \frac{Q}{V_o}$$

Donde:

$A_o$  = área total de orificios ( $m^2$ ).

$Q$  = caudal de diseño ( $m^3 s^{-1}$ ).

$V_o$  = velocidad de flujo en los orificios ( $m s^{-1}$ ).

$$n = \frac{A_o}{a_o}$$

Donde:

$n$  = número de orificios.

$a_o$  = área de cada orificio ( $m^2$ ).

En la parte inicial de los sedimentadores debe dejarse una cortina perforada para proporcionar la distribución uniforme vertical y horizontal del flujo. La velocidad del agua a través de los orificios de esa cortina debe alcanzar un valor que asegure la

distribución deseada sin perjudicar los flósculos y sin crear chorros que interfieran excesivamente con la región tranquila de sedimentación. La velocidad normalmente está comprendida entre  $0.12$  y  $0.30 \text{ ms}^{-1}$ , cuando se trata de agua floculada, para fines del agua de lluvia el valor de la velocidad debe ser menor que  $0.12 \text{ ms}^{-1}$ .

El área de cada orificio deberá calcularse de forma independiente partiendo de un diámetro propuesto; al respecto se propone normalmente  $1.0 \text{ m}$  de diámetro para los fines de sedimentadores destinados a los SCALL (Anaya, 2012).

f) Número de columnas de orificios. Se obtendrá de la expresión siguiente:

$$nc = n / nf$$

Donde:

$nc$  = número de columnas.

$n$  = número de orificios.

$nf$  = número de filas.

g) Espaciamiento entre filas de orificios. Se obtiene de la manera siguiente:

$$a1 = h / nf$$

Donde:

$a1$  = espaciamiento entre filas (m).

$h$  = altura de la pantalla difusora (m).

$nf$  = número de filas.

Se recomienda una separación entre filas de  $0.15$  a  $0.40 \text{ m}$ , mientras que el número de filas de orificios puede ser un valor propuesto.

h) Espaciamiento entre columnas. Se calcula a partir de la expresión siguiente:

$$a2 = B / nc$$

Donde:

$a_2$  = espaciamiento entre columnas (m).

B = base (m).

$n_c$  = número de columnas.

i) Altura de la pantalla. Se podrá obtener a partir de la expresión siguiente:

$$h = H - (2/5) H$$

Donde:

h = altura de la pantalla (m).

H = altura total del sedimentador (m).

El material de construcción de este tipo de sedimentadores es concreto para la pantalla difusora y mampostería para las paredes.

7. Sistema de almacenamiento: consiste en depositar el agua de lluvia en un reservorio, cisterna, tanque cisterna, a fin de que esta se encuentre disponible según se requiera.

Se propone la siguiente clasificación de sistemas de almacenamiento en función del material de construcción o fabricación (Martínez, 2011, Environment, 2009, Anaya, 2010, Juan, 2011):

1. Materiales rígidos: tanques de ferrocemento, cisterna de concreto, cisternas de cemento tabique, cisterna de metal, tanque de polietileno y estanque con malla (Fig. 6).

2. Materiales flexibles: cisternas revestidas de geomembrana o polietileno (Fig. 7).

3. Sistemas modulares: aquacell, waterwall, H<sub>2</sub>O<sub>G</sub> y depósitos soterrados (Fig. 8).

La selección de alguno de estos sistemas estará en función de la ubicación del proyecto, del volumen y del uso final que se le dará al agua.

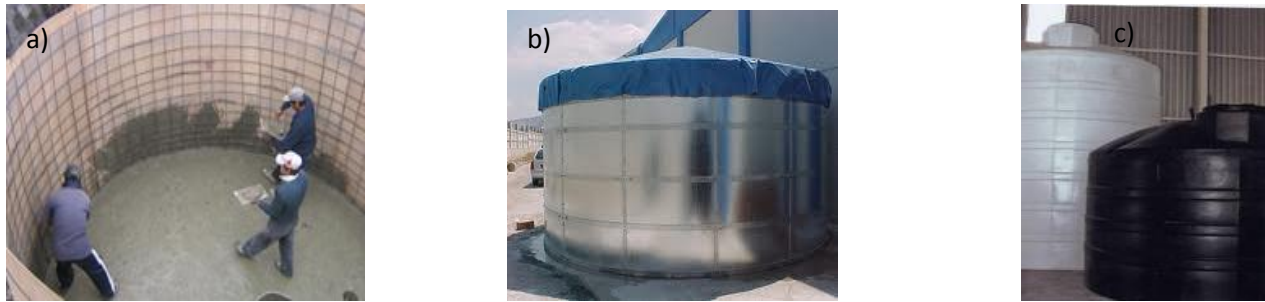


Figura 6. Sistemas rígidos de almacenamiento. (a) Tanque de ferrocemento; (b) Cisterna metálica; (c) Tanque de polietileno.



Figura 7. Sistema flexible de almacenamiento: cisterna revestida con geomembrana. Fuente: <http://web.uned.ac.cr>



Figura 8. Sistemas modulares almacenamiento de agua. (a) Aquacell; (b) Waterwall; (c) H<sub>2</sub>OG; (d) Depósito Hércules. Fuente: <http://www.ecofriend.com/eco-gadgets-waterwall-makes-rainwater-harvesting-easy-and-safe.html>.

Para determinar el volumen de agua a almacenar, el CIDECALLI propone que el cálculo se efectúe considerando la demanda mensual más dos meses adicionales, como un coeficiente de seguridad; para tal propósito se puede emplear la siguiente expresión:

$$V_{\text{cisterna}} = D_j + M_{\text{sequía} + 2}$$

Donde:

$V_{\text{cisterna}}$  = volumen mínimo de la cisterna ( $\text{m}^3$ ).

$D_j$  = demanda mensual ( $\text{m}^3 \text{mes}^{-1}$ ).

$M_{\text{sequía} + 2}$  = meses del periodo de sequía más dos meses adicionales.

#### **1.3.4 Tipos de sistema de almacenamiento.**

Como se mencionó anteriormente, existe una gama importante de sistemas de almacenamiento, los cuales se comercializan y adaptan según las necesidades del SCALL y su propósito; por ello y a fin de destacar los sistemas de almacenamiento más apropiados de acuerdo con el objetivo de esta investigación, se refieren los siguientes:

##### 1) Reservorios.

Los reservorios se pueden construir para almacenar aguas de escurrimiento provenientes de cauces, desviaciones de agua o para capturar el agua de lluvia de manera directa. De acuerdo con Salinas *et al.*, (2010), existen una serie de categorías para la cosecha de agua de lluvia basadas en el área de recolección y de depósito; así se tienen los siguientes: 1) la cosecha de agua en techos, 2) la cosecha de agua para consumo animal, 3) la microcaptación, 4) la captación de mediana escala o macrocaptación y 5) la captación a gran escala (áreas de captación con cientos de kilómetros cuadrados y estructuras complejas). De acuerdo con la anterior propuesta, los reservorios se encuentran en la categoría de mediana escala o macrocaptación y son en general, buenos sistemas que se adaptan a los usos agropecuarios, aunque también pueden ser adecuados para los fines del combate de incendios forestales añadiendo ciertas consideraciones.

Los reservorios, presentan de manera general las siguientes características:

- Captan el agua de escorrentía superficial, laminar y de arroyos.
- El área de captación, es generalmente de 30 a 200 m de radio.
- Se requiere suficiente superficie para el establecimiento del área de captación y de almacenamiento.

Asimismo, de acuerdo con la técnica constructiva pueden clasificarse de la manera siguiente:

1. Reservorios dique – represa: dique – represa con revestimiento y dique represa con gaviones.
2. Reservorios excavados: excavado y excavado con gaviones.
3. Reservorio estanque: estanque con revestimiento, envase y dique escalonado.

#### 1. Reservorios dique.

Los embalses de represa, almacenan gran parte del agua por encima de la superficie original del terreno. Se construyen en áreas con pendientes suaves a moderadas y donde la represa se puede levantar transversalmente a una depresión. El embalse se llena con agua de escorrentía (Fig. 9).

Por otro lado, se puede considerar que un estanque es una represa, cuando la profundidad del agua embalsada encima de la superficie sobrepasa los 90 cm. Asimismo, el reservorio Dique-represa con revestimiento, es necesario cuando los suelos no son arcillosos y se tiene alta infiltración del agua. Para fines del recubrimiento se emplea el plástico y la geomembrana de PVC.

La variante con gaviones se puede utilizar donde hay suficiente piedra para armar el dique. En este caso, no es necesario hacer movimientos de tierra en la depresión natural donde se construye el reservorio.



Figura 9. Reservorio dique – represa con revestimiento.



## 2. Reservorios excavados.

Los reservorios excavados almacenan gran parte del agua debajo del nivel original del suelo. Se construyen en terrenos relativamente planos y donde hay sitios adecuados para construir una represa. Se puede llenar, tanto con el agua de esorrentía como por la infiltración de agua subterránea en la excavación (Fig. 10).



Figura 10. Reservoirio excavado.

## 3. Reservoirio estanque.

Este tipo de reservoirio es muy similar al excavado, con la diferencia de que el nivel del agua se puede llevar por encima del suelo, mediante la construcción de paredes, principalmente de concreto. Se recomienda para zonas donde otros materiales de construcción no se encuentren disponibles. Cuando los suelos no son arcillosos, el piso se puede revestir con concreto, plástico o geomembrana (Fig. 11).

Por otra parte, el reservoirio dique escalonado, es una variación del reservoirio dique – represa, con el cual se aprovecha la pendiente del terreno para construir diques en serie y, de esta forma, reducir costos por movimientos de tierra.



Figura 11. Reservoirio estanque con revestimiento.

## 2) Depósitos metálicos.

Son prefabricados y se ocupan para el almacenamiento de agua en general, recientemente se han ocupado para abastecer de agua en el combate de incendios forestales. Al respecto, los casos en Iberoamérica donde estos depósitos se han empleado para este fin, aunque no a través de la captación de agua de lluvia, se concentran en España; así por ejemplo en Galicia, en cada

provincia (cuatro en total) se instaló un depósito de 11.38 metros de diámetro, 3.88 m de altura y con capacidad de 433 m<sup>3</sup>, (Sabater, 2010).

Los depósitos están formados por paneles metálicos ondulados, curvados y galvanizados, con espesor suficiente de acuerdo a la altura y diámetro (1 a 2 mm), unidos entre sí a través de una tornillería galvanizada. La superficie interior del depósito se reviste en su totalidad (piso y paredes) con geotextil de 150 gm<sup>-2</sup> y con una lona de PVC impermeable de un espesor de 0.8 mm y 120 mm. El piso del depósito, se puede fabricar con lámina, apoyándose sobre un suelo sin piedras; la lámina es flexible y se adapta fácilmente a cualquier configuración del terreno (Fig. 12 y 13).



Figura 12. Depósito metálico abierto. Fuente: metálicas BMM S.A.



Figura 13. Instalación de un depósito metálico. a) Preparación de la base de hormigón; (b) Montaje de las paredes del depósito; c) Colación de la bolsa de geotextil; d) Montaje final con la lona de PVC. Fuente: grupo Sabater.

En el mercado, es posible encontrar depósitos cuyas capacidades varían de los 5 m<sup>3</sup> a los 5000 m<sup>3</sup>, con diámetros de hasta 45 m; otras ofertas pueden ser más conservadoras y ofrecen capacidades de 1700 m<sup>3</sup> y 25 m de diámetro (Cuadro 1).

Dentro de las ventajas de este sistema se encuentran las siguientes: costo relativamente bajo en comparación con los reservorios; movimiento reducido de tierra para su instalación, por lo que demanda de poco personal y escasa maquinaria; fácil transporte a cualquier sitio, montaje y desmontaje rápido.

Cuadro 1. Dimensiones de los tanques de almacenamiento metálicos.

Diámetro	Alturas disponibles	Volumen	Peso
m	m	m <sup>3</sup>	kg
10.56	1.72	150	576
	2.54	222	864
	3.38	295	1224
	4.22	368	1668
15.82	1.72	339	864
	2.54	499	1404
	3.38	644	2052
	4.22	832	2916
25.50	1.72	877	1907
	2.54	1295	29.58
	3.38	1725	4350
45	‡	5000	‡

‡: Información no encontrada.

Fuente: soluciones medio ambientales e industriales; grupo Sabater, 2012.

### 3) Depósitos flexibles circulares con malla de acero.

Se trata de tanques flexibles construidos sobre un soporte de malla de acero reforzada o malla de acero galvanizada; en algunas versiones la malla de acero sostiene paneles cuya función es brindar soporte, de manera que la resistencia sea aun mayor que aquellos donde sólo se incluye la malla de acero (Fig. 14).

Es importante aclarar que los paneles son tolerantes al calor, condición que les permite ser incorporados a las actividades de combates de incendios forestales y a condiciones climáticas cambiantes; además no se oxidan o deforman (STK, 2011). Por otra parte, si un panel llega a sufrir algún daño, el diseño modular permite reemplazarlo sin desarmar toda la estructura. El interior del tanque se recubre con telas termoplásticas reforzadas, tales como el PVC, polipropileno o poliuretano.



Figura 14. Depósitos flexibles circulares: (a) depósito flexible con malla de acero galvanizada y paneles; (b) depósito flexible con malla de acero reforzada. Fuente: storage tank solutions.

Los diámetros de este sistema de almacenamiento son variables, de 3 hasta 20 m de diámetro, con alturas de 1.20 a 3 m; con capacidades de hasta 330 000 L; sin embargo, se pueden fabricar según las medidas que se soliciten. En el Cuadro 2 se presentan algunas de las dimensiones frecuentes de comercialización. Son altamente recomendables para recoger y almacenar el agua de lluvia, de manera que pueden integrarse con facilidad a los SCALL.

En suma, estos sistemas flexibles presentan varias ventajas, dentro de las cuales se encuentran: que son portátiles, flexibles, económicos, de larga duración, de fácil armado y desarmado, por lo que no requieren de capacitación o de conocimientos especializados.



Figura 15. Instalación de depósitos flexibles con paneles. (a) Armado del depósito flexible con malla de acero galvanizada; (b) Levantado de las paredes; (c) Ensamblado de la estructura con los paneles. Fuente: Storage Tank Solutions, 2012.

Cuadro 2. Dimensiones de los depósitos flexibles con malla de acero.

Número de paneles	Diámetro del tanque	Volumen
	m	L
6	3.06	7000
7	3.57	10000
8	4.07	13000
9	4.58	16000
22	11.2	95000
23	11.71	103000
24	12.22	113000
25	12.73	122000
38	19.35	284000
39	19.86	299000
40	20.37	314000
41	20.88	330000

Fuente: storage tank solutions, 2012.

#### 1.4. Los sistemas de información geográfica y la planeación territorial

Como se mencionó en los apartados anteriores, la sencillez de diseño e instalación de los SCALL, sus beneficios y sus usos múltiples los hacen una herramienta muy útil para la cosecha del agua de lluvia; sin embargo, instalar un SCALL a nivel regional puede requerir la congregación de muchos factores; por ejemplo: las características hidrológicas del área, los intereses socio – económicos de autoridades locales, las opiniones de tomadores de decisiones o los aspectos técnicos puntuales vinculados con la naturaleza del SCALL.

Un Sistema de Información geográfico (SIG) se define de diferentes maneras, algunas enfatizan el aspecto tecnológico del SIG como: un sistema computarizado usado para capturar, almacenar, editar, analizar y desplegar datos geográficos geo-referenciados (Poole, 1995).

En este concepto la información sobre localización está ligada a datos no espaciales llamados atributos. La principal fortaleza del SIG en este contexto es la integración de bases de datos espaciales y la creación de capas de información para diferentes temas, las cuales pueden sobreponerse unas a otras, mostrando relaciones espaciales complejas entre las variables. El GIS

de esta forma tiene 5 funciones generales: entrada, manipulación, preguntas, análisis y visualización (Johnson, 1997).

Al definir el SIG como una herramienta tecnológica se pierde su verdadero valor que es su habilidad de integrar información y ayudar a la toma de decisiones, en este proceso está incluido el rasgo esencial de SIG que es la referencia espacial y el análisis de datos. En este contexto el propósito del SIG es dual:

Primero: el análisis espacial. Por lo tanto, sus capacidades se limitan por una parte a la captura de datos y a la salida cartográfica. Las características de la base de datos (precisión, continuidad, etc.) serán aquellas apropiadas para la producción de mapas a escala local y por la otra, el uso de las interfaces vector y raster también disponibles en el SIG para la generación de nuevos datos. Un ejemplo sería la generación de un modelo para evaluar la aptitud territorial en un SCALL.

Segundo: La capacidad de análisis para apoyar la toma de decisiones en proyectos específicos o áreas geográficas pequeñas. En este caso la topología es la red sobre la cual sobreyacen la estructura de los datos para el análisis espacial y toma de decisiones. Un ejemplo de SIG en este contexto sería el diseño de un SCALL para el abastecimiento de agua de aeronaves en el control de incendios forestales, en la cual parte de la información sería proporcionada por los expertos y locales para construir un modelo de toma de decisiones sobre la localización de los sitios de los SCALL.

#### **1.4.1. Sistemas de Información Geográfica (SIG) participativos.**

A partir de los debates acerca de los beneficios del SIG se ha generado enfoques como SIG público participativo y SIG integrado a la comunidad (Harris y Weiner, 1998-a; Kyem, 1998). Estos conceptos están ligados a los conceptos de desarrollo participativo y manejo de los recursos con base en las comunidades.

Harris y Winer (1998-b) señalan que los SIG integrados a las comunidades deben cumplir lo siguiente:

- Posiblemente dirigidos por agencias, pero no con un enfoque desde arriba (Top-Down) ni favoreciendo el conocimiento experto convencional.
- Asumir que el conocimiento local es valioso y experto.

- Ampliar el acceso a la tecnología de información y bases de datos digitales.
- Incorporar los paisajes de las realidades múltiples observables diferenciadas socialmente.
- Explorar el potencial para un proceso de toma de decisiones espaciales más democrático a través de una mayor participación de la comunidad en la toma de decisiones.
- Asumir que la toma de decisiones espaciales está dirigida por conflictos y ligada a la política local.

El SIG ha sido utilizado como una herramienta en la toma de decisiones y solución de problemas en la captación de agua de lluvia (Mbilinyi *et al.*, 2007). Numerosos estudios se han enfocado en su aplicación a fin de determinar la aptitud de los territorios para la instalación de los SCALL. Así, De Winnaar *et al.* (2007), desarrollaron un método para identificar sitios potenciales destinados a la captación de escurrimientos superficiales mediante el uso de los SIG, herramienta con la que fue posible integrar una serie de variables que influyen en esta aptitud; asimismo, permitió la modelación de respuestas hidrológicas que facilitaron la toma de decisiones para su construcción. Sekar y Randhir (2007), desarrollaron una aproximación espacial con el objetivo de ubicar sitios óptimos para la captación o de recarga de acuíferos, conjuntando el potencial de captación con evaluaciones económicas. Mohtar *et al.* (2006), presentaron una estructura de redes basada en un sistema de ubicación de reservorios que tuvo aplicación en una cuenca local.

En este estudio se probó la bondad de los SIG para analizar datos espaciales de diversa índole aplicando las siguientes técnicas espaciales para analizar las variables identificadas como determinantes para la instalación de SCALL en la recarga de agua de las aeronaves para el control de incendios forestales: interpolación lineal basada en la distancia (IDW), operaciones algebraicas con coberturas raster, densidad de puntos y distancia euclidiana. Las variables espaciales representaban áreas extensas del territorio, sin embargo, fueron integradas con facilidad en un mapa de aptitud empleando un software como Arc Gis a través del módulo de análisis espacial así como del uso de una regla de decisión apropiada, en este caso, la combinación lineal ponderada. Los mapas de aptitud territorial son ampliamente usados en la planeación territorial ambiental y de otros sectores; a través de ellos se simplifica el análisis del territorio y se facilita la toma de decisiones. La planeación de las actividades de prevención y

control de incendios forestales no son la excepción pues los mapas de aptitud se emplean con frecuencia para ilustrar el riesgo de incendios forestales y decidir sobre la ubicación de infraestructura de apoyo; otro caso es el de las tecnologías de SCALL, pues permiten definir la mejor tecnología a implementar en un territorio en función de sus características ambientales y sociales.

En resumen, con la evolución de los SIG se ha facilitado ubicar los sitios más adecuados para los SCALL en diversos estudios; aun más el uso de esta tecnología puede fácilmente aplicarse al desarrollo de la planeación y manejo a nivel comunitario en materia de captación de agua de lluvia.

#### **1.4.2 Análisis de aptitud con técnicas multicriterio**

Ubicar sitios para la captación de agua de lluvia, en un contexto geográfico, puede representar un problema de decisión espacial complejo, pues involucra elementos de naturaleza hidrológica, geomorfológica, climática, usos del suelo, infraestructura e intereses sociales. En este sentido, el análisis de aptitud es una estrategia útil para resolver este tipo de problemas, ya que permite evaluar las características del terreno que favorecen todos los elementos antes citados, y proponer, a partir de esto, el mejor sitio para el establecimiento del SCALL.

No obstante, el éxito del análisis de aptitud depende de cómo son incluidas en el estudio las interacciones entre las variables (atributos) y de cómo las reglas de decisión son construidas; el objetivo es considerar la mayoría de las variables, satisfaciendo los requerimientos de cada una. Los métodos multicriterio son una forma particular de clasificación, en donde el análisis de los problemas se logra al clasificar los objetos, a través de reglas de decisión (Fernandez et al., 2009). En este sentido, los métodos multicriterio, cuando se vinculan a los SIG, responden al problema en cuestión, atendiendo a cada uno de sus objetos o componentes, construyendo con ellos reglas de decisión claras para cada variable o entre ellas; dichas variables pueden ser de naturaleza cuantitativa o cualitativa a fin de poder encontrar el mejor territorio o espacio.

#### **1.4.3. El análisis multiatributo**

Desde el punto de vista del análisis multicriterio – multiobjetivo, la planeación territorial es abordada como un problema de decisión donde los tomadores de decisión deben encontrar el



patrón de uso del territorio que mejor convenga, a fin de que las actividades sectoriales se desarrollen con la máxima aptitud. Bajo este enfoque, el proceso de toma de decisión abarca una secuencia de actividades que comienza por identificar el problema y termina con una serie de recomendaciones para cada alternativa. En general la secuencia multiatributo es la siguiente:

- a) Reconocimiento del problema. El tomador de decisiones reconoce la existencia de diferencias entre el estado actual y el deseado para un sistema.
- b) Identificación de criterios de evaluación. Incluye la definición del conjunto de objetivos que refleje todos los aspectos relevantes a considerar en el problema y las medidas (atributos) necesarios para satisfacer esos objetivos.
- c) Generación y evaluación de alternativas. La generación de las alternativas a evaluar se hace a partir de la generación de los mapas de criterios.
- d) Selección de una alternativa. En este punto es necesaria la construcción de reglas de decisión diseñadas para seleccionar la mejor alternativa que de solución al problema planteado.
- e) Análisis de sensibilidad. Sirve para valorar la robustez del proceso al determinar cómo afectan los cambios pequeños en las entradas del análisis a la línea de acción recomendada (solución).

En consecuencia, un problema de decisión multicriterio involucra un conjunto de atributos, de objetivos o de ambos. Para este propósito es necesario definir reglas de decisión que permitan el análisis de las variables que conforman el problema. De acuerdo con Jacek (2006), son dos las técnicas fundamentales para evaluar con el método multicriterio: el álgebra de mapas booleano y la combinación lineal ponderada; por su parte, la SEMARNAT (2006) propone una regla de decisión más, la distancia al punto central. A continuación se mencionan las técnicas más importantes de evaluación multicriterio (reglas de decisión):

#### 1) Combinación lineal ponderada binaria

El enfoque multiatributo más sencillo consiste en emplear variables de decisión binarias.

$$X_j^k = (0, 1)$$

Esto es, los píxeles de las capas de información que representan cada atributo toman el valor de uno ( $X_j^k = 1$ ) cuando el estado del atributo es favorable, en tanto que cero ( $X_j^k = 0$ ) en el caso contrario. Para ello, es necesario convertir los mapas de los atributos ambientales a mapas binarios mediante operaciones de reclasificación en el SIG.

Mediante el álgebra lineal ponderado binario se obtiene un valor de aptitud para cada alternativa de decisión al sumar los productos del valor de cada atributo que caracteriza dicha alternativa por el peso de importancia asignado a ese atributo. La siguiente es la expresión matemática de esta regla:

$$a_j^k = \sum_i^n W_{ij} W X_{ij}^k$$

Donde:

$a$  = valor de aptitud de la alternativa  $k$ , para el problema  $j$ .

$W$  = peso de importancia asignado para el atributo  $i$  por el problema  $j$ .

$X$  = valor que toma la variable de decisión binaria que representa el atributo  $i$ , que condiciona el objetivo del sector  $j$ .

## 2) Combinación Lineal Ponderada con Funciones de Utilidad

Consiste básicamente en una combinación lineal donde se le ha incorporado funciones de utilidad para determinar el valor que toman las variables en una escala de intervalo estandarizada (0 - 1), en lugar de binaria. Para guardar congruencias en las operaciones conviene expresar los pesos de importancia relativa de los criterios de decisión en la misma escala de las variables de decisión. La fórmula matemática formal para esta regla de es:

$$a_j^k = \sum_i^{n_j} W_{ij} U(X_{ij}^k)$$

Donde:

a = valor de aptitud de la alternativa k, para el sector j.

W = peso o valor de importancia relativa al significado al atributo i por el sector o problema j.

$U(X_{ij}^k)$  = función de utilidad para el atributo i que condiciona el objetivo del sector o problema j.

### 3) La distancia al punto ideal.

Con este método, la aptitud del territorio para cada actividad sectorial se evalúa por medio de una regla de decisión que “mide” la cercanía de cada alternativa de decisión a un valor o punto ideal. Este punto representa una alternativa hipotética, cuya aptitud es máxima. Es decir, en el que los atributos o elementos del problema alcanzan el nivel más alto posible. La distancia al punto ideal (DPI) es medida en términos de una determinada métrica; generalizando para una familia de métricas empleando una escala de intervalo estandarizada (0 - 1).

$$d_j^k = \sqrt[p]{\sum_i W_{ij}^p (1-X_{ij}^k)^p}$$

Donde:

d = es la distancia del punto ideal de la alternativa k, para el sector j.

W = es el peso o valor de importancia relativa asignado al atributo i por el sector j.

1 = punto ideal

X = valor del atributo i

p = parámetro exponencial cuyo valor tomado del intervalo (1 - ∞), determina la métrica con que se mide la distancia al punto ideal.

Aplicar estas técnicas requiere de la participación de expertos o de tomadores de decisiones, a fin de establecer los valores de ponderación, o bien recurrir a una técnica que compara las variables de forma pareada con el propósito de definir su peso relativo a través del conocimiento experto; sin embargo, reservando la ponderación, las técnicas aquí presentadas pueden aplicarse con relativa facilidad al análisis multicriterio para integrar las variables del problema establecido, en este caso la ubicación de un SCALL para el combate de incendios forestales.

### **1.5. El conocimiento local.**

La complejidad natural del manejo sustentable de los recursos naturales requiere investigaciones que empleen sistemas de acercamiento; por ejemplo, las investigaciones interdisciplinarias combinan aspectos biofísicos y socioeconómicos para entender las interrelaciones de los componentes en un sistema (Barr y Dixon, 1998). El manejo de los recursos naturales a través de la participación comunitaria está siendo ampliamente adoptado para resolver esta complejidad. Así, la participación y el conocimiento de los grupos locales (agricultores) se entiende como un recurso valioso a nivel del manejo de los recursos naturales, toma de decisiones y procesos de planeación política.

Al respecto, cada vez más los responsables de la planeación, tomadores de decisiones, extensionistas e investigadores se han percatado del enorme potencial que representa el conocimiento local; sin embargo, su aplicación continua, hasta el presente, como un reto ante la falta de parámetros para conservarlo y aplicarlo, e incluso este hecho pone en riesgo su continuidad.

El conocimiento local está íntimamente ligado a la cultura o a la sociedad y es considerado como único. Es la base para tomar decisiones a nivel local en agricultura, salud, alimentación, educación, manejo de recursos naturales y una amplia variedad de actividades en las comunidades (World Bank, 1998; Subba Rao, 2006). Existen una serie de sinónimos para denominar al conocimiento local y aunque se pueden hacer algunas distinciones, en general se consideran lo mismo: conocimiento indígena, conocimiento tradicional, conocimiento comunitario o conocimiento rural.

De acuerdo con Warren y Rajasekaran (1993), el conocimiento local es un recurso nacional de gran valor porque:

a) Incluye conceptos prácticos que pueden ser usados para facilitar la comunicación a través de la gente con diferentes antecedentes como a los investigadores en agricultura y a los extensionistas.

b) Ayuda a asegurar que el usuario final de alguna tecnología o proyectos se involucren en el desarrollo de éstas, de manera que sean apropiadas a sus necesidades.

c) Representa la base para la toma de decisiones y es empleado a través de organizaciones indígenas.

d) Su relación costo – beneficio es completamente positiva, dado que se construye desde los esfuerzos de desarrollo local.

e) El conocimiento local tiene un importante papel facilitando el dialogo entre poblaciones rurales y desarrolladores.

Considerando el gran potencial de los SCALL para incrementar la disponibilidad de agua y en consecuencia la productividad y eficiencia de diferentes sistemas (Mbilinyi *et al.*, 2005); múltiples esfuerzos se desarrollan en todo el mundo para promover el incremento en el uso de esta tecnología. No obstante, los SCALL no son ajenos a la gente, al menos no para los habitantes de las comunidades; pues en muchos casos han dependido de las mismas para sobrevivir e incluso han desarrollado, a través de los siglos, técnicas propias para captar agua de lluvia. Si bien es cierto que los actuales SCALL han alcanzado un nivel de mayor sofisticación empleando las actuales herramientas y sistemas disponibles en el amplio mercado del agua, la suma de estas dos visiones (la tradicional y moderna) pueden resultar en el desarrollo del SCALL más adecuado a las condiciones ambientales y sociales a donde están destinados a instalarse. Por ello, para desarrollar estrategias sustentables de SCALL es importante tomar muy en cuenta lo que la población local de antemano conoce.

### **1.5.1. Las metodologías participativas**

La realidad de la gente del medio rural se conceptualiza como local, compleja, dinámica y no controlable. La pregunta en este tipo de ambiente es como aprendemos sobre y acerca de los valores, prioridades y preferencias de las personas que viven en estos ambientes (Chambers, 1980). En este contexto el diseño de modelos de desarrollo deberá partir de la información generada por respuesta/apreciación de los usuarios y su interacción con los recursos. El enfoque para la colección de información sobre los recursos disponibles en cada comunidad debe considerar variaciones a nivel micro en la tierra, clima, suelos y factores socio-económicos, además el proceso de toma de decisiones deberá considerarse a nivel de comunidad basándose en los recursos disponibles y los usos actuales (Ojeda, 2001).

Las técnicas participativas se enfocan en el desarrollo de las capacidades humanas para evaluar, elegir, planear, crear, organizar y tomar iniciativas; pueden, en general, llevarse a otros

aspectos de la vida de la gente y de la comunidad (Srinivasan, 1990). Asimismo, las técnicas participativas no sólo ayudan a la comunidad a desarrollar sus habilidades, además, permite a los externos a entender mejor las necesidades de la comunidad, permitiendo el desarrollo de proyectos basados en la realidad más que en suposiciones o apreciaciones externas (UNEP, 2004).

Existen muchas técnicas y herramientas usadas para promover la participación comunitaria. Dos técnicas ampliamente usadas en las investigaciones sociales son: a) la evaluación rural rápida (ERR) y b) la evaluación rural participativa (ERP); la primera, es usada por un facilitador para obtener información acerca de la comunidad de una forma rápida, mientras que la segunda, evalúa el conocimiento local a través del conocimiento del facilitador y ayuda a fortalecer la capacidad de análisis y decisión de la comunidad (UNEP, 2004).

Estas técnicas son enfoques de investigación y planeación prácticos que apoyan una planeación más descentralizada y un proceso de toma de decisiones más democrático que valora la diversidad social y están enfocados en buscar la sustentabilidad en el uso de los recursos buscando una mayor y mejor participación de la comunidad, propiciando su poder para actuar en el proceso de planeación. Esto es, el permitir la gente en la localidad el conducir su propio análisis de recursos, decidir la estrategia y ejecutar la acción.

Estas técnicas permiten la colección de información sobre la base de recursos y el uso que la gente hace de ellos. El análisis de esta información es realizado conjuntamente con la gente de la comunidad y permite entender el proceso de toma de decisiones sobre uso de la tierra. El proceso de toma de datos y su análisis de manera conjunta utilizando SIG permite el diseñar los modelos de los usos de los recursos y establecer las bases para incorporar la información disponible y útil para la generación de modelos. En este contexto el proceso de la toma de decisiones de uso tiene como punto de partida el inventario de los recursos y los usos actuales y el conocimiento de cómo los recursos se usan y su problemática local. Este procedimiento llevará a propuestas de uso y manejo de recursos para el desarrollo de una estrategia que emergerá a través del análisis de los planes y acciones pasados, actuales y futuros seguidos por la gente a nivel local (Ojeda, 2001).

## LITERATURA CITADA

- Anaya G. M. 2011. Captación del agua de lluvia: solución caída del cielo. Colegio de Postgraduados. 132 p.
- Anaya G. M. 2012. XVII Diplomado Internacional en Sistemas de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia para Consumo Humano, Producción de Traspatio, Ambientes Controlados, Agricultura de Temporal y Recarga de Acuíferos. Texcoco, Estado de México. México, Colegio de Postgraduados. p:537.
- Aviones y Helicópteros de Colombia S.A. 2011. Extinción de incendios [en línea]. Disponible en: <http://www.aviheco.com/servicios.html#nueve> (revisado el 19 de enero de 2012).
- Avedo, N., J.M. 1975. Experiencia brasileña en el diseño de sedimentadores. Simposio sobre nuevos métodos de tratamiento de agua. Asunción, 14 - 18. 1972. Lima, CEPIS. p 39.
- Barr, J. J. F. and Dixon, P. J. 1998. Incorporating farmers' and fishers' knowledge into natural resources - systems research on the Bangladesh floodplains. Tropical agriculture association newsletter 19:32-35.
- Burkhard, R., A. Deletic, and A. Craig. 2000. Techniques for water and wastewater management: a review of techniques and their integration in planning. Urban Water 2: 197-221.
- Carmona I. 2011. Combaten fuego en las zonas forestales, Diario Milenio [en línea]. Disponible en: <http://edomex.milenio.com/cdb/doc/noticias2011/7124535617041c8e5402057a53f44f15> (revisado el 5 de enero de 2012).
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. 2001. Lima, Perú. 18 pp.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. 2005. Lima, Perú. 34 pp.
- Chambers, R. (1980). The Small Farmer is a Professional. Ceres. March-April: 19-23.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2004. Protección, restauración y conservación de suelos forestales. Manual de obras y prácticas. 2da. Ed. Zapopan, Jalisco, México. 210 pp.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Informe de incendios forestales en el Estado de Coahuila, temporada 2011. CONAFOR. Zapopan, Jal. 92 p.

- De Winnaar, G., J. Gpw, and M. Horan. 2007. A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 32:1058-1067.
- Donovan, G. and T. Brown. 2007. Be careful what you wish for: the legacy of Smokey Bear. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5:73-99.
- Environment Agency United Kingdom. 2009. Rainwater Harvesting: an on - farm guide. Almondsbury, Bristol. United kingdom [en línea]. Disponible en <http://publications.environment-agency.gov.uk/PDF/GEMI1109BRGU-E-E.pdf> (Consultado el 15 de diciembre de 2011).
- Fernández, E. y M. T. Montaña. 2009. Estado de México ocupa primer lugar nacional en incendios forestales. *El universal* [en línea]. Disponible en <http://www.eluniversal.com.mx/notas/580005.html> (Consultado el 10 de enero de 2012).
- Fernández, E., J. Navarro, and S. Berna. 2009. Multicriteria sorting using a valued indifference relation under a preference disaggregation paradigm. *European Journal of Operational Research* 198:602-609.
- Firestone. Disponible en [http://www.firestonelining.eu/lining/syst\\_comp/epdm\\_geomembrane/\\_es/](http://www.firestonelining.eu/lining/syst_comp/epdm_geomembrane/_es/) (Consultado el 12 de febrero de 2012).
- Fumigación Aérea Andaluza S.A. 2011. Augusta A 119 Koala Córdoba, Argentina [en línea]. Disponible en <http://www.faasa.org/es/quienes-somos/resena-historica.html> (revisado el 5 de enero de 2012).
- Flight Service. 2009. Helicóptero bell 205 modelo uh-1h. Arauco, Chile [en línea]. Disponible en <http://www.flightservice.cl/vuelo-y-apoyo.html> (Consultado el 15 de enero de 2012).
- Galindo, E., E. 2008. Captación de agua de lluvia y retención de suelo en jollas en el parte aguas de las cuencas de los ríos Actopan y Amajac. *Boletín del Archivo Histórico del Agua. Tlalpan, México* [en línea]. Disponible en <http://www.geografosdecanarias.org/pdf/articulos/gaviascanarias.pdf> (Consultado el 10 de febrero de 2012).
- Giráldez J. V., J. L. Ayuso, A. García, J. G. López, and J. Roldán. 1988. Water harvesting strategies in the semiarid climate of southeastern Spain. *Agricultural Water Management* 14:253-263.
- Gobierno del Estado de México - Secretaría de Ecología. 2005. Diagnóstico Ambiental, Región III Ecatepec. Toluca, Estado de México.



- González C., S. 2011. Estado de México, primer lugar nacional en incendios forestales, según Probosque. La jornada [en línea]. Disponible en <http://www.jornada.unam.mx/2011/02/11/estados/041n2est> (Consultado el 19 de noviembre de 2011).
- Harris, T. and D. Weiner (1998-a). Community-Integrated GIS for Land Reform in Mpumalanga Province, South Africa [En línea]. Disponible en <http://www.ncgia.ucsb.edu/varenius/ppgis/papers/harris.html>. (Consultado el 22 de agosto de 2012)
- Harris, T. and D. Weiner.1998b. Empowerment, Marginalization and “Community-Integrated”. GIS. *Cartography and Geographic Information Systems* 25(2):67-76.
- Herawati, H. and H. Santoso. 2011. Tropical forest susceptibility to and risk of fire under changing climate: a review of fire nature, policy and institutions in Indonesia. *Forest Policy and Economics* 13:227-233.
- Hernández, G., O.A. 2009. Los incendios forestales en la región III Texcoco, estado de México durante el periodo 2005 - 2009. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo; Texcoco, Estado de México.
- Jacek, M. 2006. Ordered weighted averaging with fuzzy quantifiers: GIS-based multicriteria evaluation for land-use suitability analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8:270-277.
- Johnson, B. (1977). The Use of Geographic Information Systems (GIS) by First Nations [En línea]. Disponible en <http://www.nativemaps.org/StoriesNewsReviews/Reviews/abstracts/Ben.html> (Consultado el 23 de agosto de 2012).
- Juan M., J. 2011. Estrategias para el abastecimiento de agua a comunidades marginadas y urbanas. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados; Texcoco, Estado de México.
- Kyem, P. 1998. Promoting Local Community Participation in Forest Management Through The Application of a Geographic Information System: A PPGIS Experience form Southern Ghana [En línea]. Disponible en <http://www.ncgia.ucsb.edu/varenius/ppgis/papers/kyem/kyem.html> (Consultado del 22 de agosto de 2012).
- Laurence, W., F. 2003. Slow burn: the insidious effects of surface fires on tropical forest. *Trends in Ecology and Evolution* 18:209 - 212.

- Lozano F., J., S. Suárez - Seoane, and E. De Luis. 2007. Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modelling. *Remote Sensing of Environment* 107:533-544.
- Macomber, S. H. P. 2010. Guidelines on Rainwater Catchment Systems for Hawaii. University of Hawai‘i at Mānoa [en línea]. Disponible en <http://www.ctahr.hawaii.edu/oc/freepubs/pdf/rm-12.pdf> (Consultado del 15 de enero de 2012).
- Matthews, E., R. Payne, M. Rohweder, and S. Murray. 2000. Pilot analysis of global ecosystems: forest ecosystems. World Resources Institute. United State of America. (Disponible en línea en <http://www.wri.org/publication/pilot-analysis-global-ecosystems-forest-ecosystems>) (Consultado el 15 de enero de 2012).
- Mbilinyi, B. P., Tumbo, S. D., Mahoo, H. F., Senkondo, E. M. and Hatibu, N. 2005. Indigenous knowledge as decision support tool in rainwater harvesting. *Physics and chemistry of the earth, Parts A/B/C* 30:792-798.
- Mbilinyi, B. P., S. D. Tumbo, H.F. Mahoo, and F.O. Mkiramwinyi. 2007. GIS-based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 32:1074-1081.
- Mohtar, H. R., T. Zhai, J. Y. Choi, B. Adrian, M. Ouassar, F. Abdelli, and E. Bernard. 2006. Web-based GIS-hydrologic Modeling for siting water harvesting Reservoirs. *14th International Soil Conservation Organization Conference*. Marrakech, Morocco.
- Ojeda T. E. 2001. GIS and Land Use in Texcoco Municipality, México: Contrasting Local and Oficial Understanding. PHD thesis in geography. University of Durham, England.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 1989. Arid zone forestry: a guide for fields technicians. Rome, Italy [en línea]. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/T0122E/T0122E00.htm> (Consultado el 12 de febrero de 2012).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2003. Curso de capacitación sobre la captación de agua de lluvia. Land and Water Digital Media Series. CD - ROM companion [CD - ROM computer file]. Roma, Italia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2005. State of the world's forest. Roma, Italia [en línea]. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/007/y5574e/y5574e00.htm> (Consultado el 19 de noviembre de 2011).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Situación de los bosques del mundo 2007. Roma, Italia [en línea]. Disponible en

- <http://www.fao.org/docrep/009/a0773e/a0773e00.htm> (Consultado el 19 de noviembre de 2011).
- Oropeza, M. J. 2011. Notas del curso de conservación de suelo y agua. Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- Oweis, T. and A. Hachum. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in west Asia and north Africa. *Agricultural Water Management* 80:57 – 73.
- Palerm, V., J. 2002. Antología sobre pequeño riego. Sistemas de riego no convencionales. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México. (Disponible en línea en [http://jacintapalerm.hostei.com/Antologia\\_III\\_Indice.htm](http://jacintapalerm.hostei.com/Antologia_III_Indice.htm)) (Consultado el 17 de enero de 2012).
- Poole, P. 1995. Guide to The Technology. *Cultural Survival Quarterly* 18(4):16-18.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2003. Geo América Latina y el Caribe. Perspectivas del medio ambiente 2003. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Costa Rica (Disponible en línea en <http://www.pnuma.org/deat1/pdf/GEO%20ALC%202003-espanol.pdf>) (Consultado el 17 de octubre de 2011).
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). 2008. Manual de captación de aguas de lluvia para centros urbanos. 47 pp. [En línea]. Disponible en <http://www.pnuma.org/reclat/esp/documentos/MANUALDECAPTACION%20oct%2008.pdf> (Consultado el 23 de agosto de 2012).
- Promotora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). 2007. Combatirán incendios por aire. Toluca, Estado de México [en línea]. Disponible en <http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/inicio/index.htm> (Consultado el 20 de enero de 2012).
- Promotora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). 2011. Probosque en alerta durante la temporada de estiaje [en línea]. Disponible en [http://www.forestalxxi.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=243:probosque-en-alerta-durante-la-temporada-de-estiaje&catid=76:probosque&Itemid=70](http://www.forestalxxi.com/index.php?option=com_content&view=article&id=243:probosque-en-alerta-durante-la-temporada-de-estiaje&catid=76:probosque&Itemid=70) (Consultado el 20 de enero de 2012).
- Pyne, S. 2007. The meaning of megafires and the means of their management. Proceedings of IV International Wildfire Conference. Spain, Seville [en línea]. Disponible en [http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/doc/cd/INTRODUCTORIAS\\_ST/Pyne\\_ST1.pdf](http://www.fire.uni-freiburg.de/sevilla-2007/contributions/doc/cd/INTRODUCTORIAS_ST/Pyne_ST1.pdf) (Consultado el 14 mayo de 2011).

- Rodríguez, T. D. A., M. Rodríguez. A., y F. Sánchez. F. 2000. Educación e incendios forestales. Editorial Mundi-Prensa. México, D.F.
- Rodríguez, T. D. A., J. Santillán. P., y M. Tchioué H. 2006. El perfil actual del combatiente oficial de incendios forestales en México. Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 12:79 - 86.
- Grupo Sabater. 2010. Depósitos de agua contra incendios forestales en España [en línea]. Disponible en [http://www.sabatergrup.com/gestion\\_de\\_agua\\_depositos\\_embalses\\_desmineralizacion.asp](http://www.sabatergrup.com/gestion_de_agua_depositos_embalses_desmineralizacion.asp) (Consultado el 19 de enero de 2012).
- Salinas A. A., R. Rodríguez. Q., y D. Morales. H. 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. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Costa Rica. (Disponible en línea en <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/a00273.pdf>) (Consultado el 02 de Febrero de 2012).
- Schietecatte, W., M. Ouessar, D. Gabriels, S. Tanghe, S. Heirman, and F. Abdelli. 2005. Impact of water harvesting techniques on soil and water conservation: a case study on a micro catchment in southeastern Tunisia. *Journal of Arid Environments* 61: 297-313.
- Seijo, F. 2009. Who framed the forest fire? State framing and peasant counter-framing of anthropogenic forest fires in Spain since 1940. *Journal of Environmental Policy & Planning* 11:103-128.
- Sekar, I. and T.O. Randhir. 2007. Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology* 334:39-52.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). Recursos forestales. ([http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia\\_mce/html/mce\\_index.html](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/mce_index.html)) (22 de febrero de 2012).
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2005. Incendios Forestales y Superficie Afectada [en línea]. Disponible en [http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/SNIARN/pdf/el\\_ambiente\\_numero\\_2011.pdf](http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/Documents/SNIARN/pdf/el_ambiente_numero_2011.pdf) (Consultado el 9 de noviembre de 2011).
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2006. Manual del proceso de ordenamiento ecológico. Dirección General de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial. (Disponible en línea en

[http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id\\_pub=540](http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=540)  
(Consultado el 10 de febrero de 2012).

Srinivasan, L. 1990. Tools for community participation. A manual for training trainers in participatory techniques. Prowwess/UNDP. Ed. New York. New York. 181 p.

Storage Tank Solutions. 2011. Tanques de almacenamiento de gran volumen. Ohio, E.U [en línea]. Disponible en <http://www.storagetanksolutions.com> (Consultado el 10 de febrero de 2012).

Subba Rao, S. 2006. Indigenous knowledge organization: an Indian scenario. International journal of information management 26:224-233.

Tollner, E. W., D. Meyer, S. Triminio-Meyer, B. P. Verma, G. Pilz, and J. J. Molnar. 2004. Spreadsheet tools for developing surface water supplies for freshwater fish production in developing countries. Aquacultural Engineering 31:31-49.

UACH - CONAFOR. 2011. Evaluación del Programa de Prevención y Combate de Incendios Forestales de la CONAFOR. Ejercicios fiscales 2008-2010. UACH - CONAFOR. Chapingo, Edo. de México, México. 371 pp.

United Nations Environment Program (UNEP). 1997. Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean. International Environmental Technology Centre. Osaka-Shiga, Japan. (Disponible en línea en <http://www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub-8c/>) (Consultado el 10 de noviembre de 2011).

United Nations Environment Program (UNEP). 2004. Harvesting the heavens. Suva, Fiji Islands. p 129.

Warren, D. M. and Rajasekaran, B. 1993. Putting local knowledge to good use. International agriculture development 13:8 - 10.

World Bank. 1998. Indigenous knowledge for development - A framework for action. Knowledge and learning Center, Africa. p 49.

Villiers R., M de L. 2006. Incendios forestales. Revista Ciencias 81:60 - 66.

Wang, L., J. J. QU, and X. HAO. 2008. Forest fire detection using the normalized multi-band drought index (NMDI) with satellite measurements. Agricultural and Forest Meteorology 148:1767-1776.

**CAPÍTULO 3. APTITUD TERRITORIAL PARA ESTABLECER  
SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CONTRA  
INCENDIOS FORESTALES**

## **APTITUD TERRITORIAL PARA ESTABLECER SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA CONTRA INCENDIOS FORESTALES**

José María León Villalobos,<sup>1</sup> Manuel Anaya Garduño,<sup>1</sup> José Luis Oropeza Mota,<sup>1</sup> Enrique Ojeda Trejo,<sup>1</sup> Dante Arturo Rodríguez Trejo<sup>2</sup> y Jorge Luis García Rodríguez<sup>3</sup>

### **RESUMEN**

Los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL), pueden ser usados para proveer de agua al control aéreo de incendios forestales; la ubicación estratégica de estos sistemas en zonas de alta incidencia de incendios, es fundamental para mejorar la eficiencia en el control de los mismos. En el presente estudio, se efectuó un análisis espacial que evalúa la aptitud territorial para establecer SCALL en los municipios de Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca, en el oriente del estado de México, México. Se seleccionaron cinco variables para ubicar el emplazamiento de los SCALL: velocidad de viento, distancia a caminos, escurrimiento superficial, evaporación y densidad de incendios. Estas fueron cartografiadas y priorizadas con el apoyo de conocimiento experto, para finalmente ser integradas por el método de decisión multicriterio. Se identificaron en el área de estudio dos zonas con aptitud, que satisfacían a la mayoría de las variables, una al norte y la otra al sur. Asimismo, se concluyó que la identificación de áreas con aptitud a través de este método representa una herramienta útil para establecer los SCALL. Por otra parte, al incluir el conocimiento experto así como visitas de campo, se puede definir el mejor sitio y diseño de SCALL más costeable y de menor impacto ambiental.

Palabras clave: Análisis multicriterio, control aéreo de incendios forestales, curvas numéricas, densidad de incendios forestales, escurrimiento superficial, velocidad de viento.

---

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Correo e: jomalevi@yahoo.com.mx

<sup>2</sup> División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

<sup>3</sup> Subgerencia de inventario y monitoreo de suelos forestales. Comisión Nacional Forestal.

## **ABSTRACT**

Rainwater harvesting system can be used to the Aero Tech fire-fighting in order to improve the practice, its strategic location in places with high recurrence of fire is necessary to improve the efficiency in the fire - fighting with helicopter. In this study a spatial analysis for the evaluation of the suitability for the location of rain water harvesting (RWH) for aero fire-fighting is developed for three municipalities Chalco, Ixtapaluca and Tlalmanalco, in east of Mexico state, Mexico. Five variables were used for the selection of sites: wind speed, distance to roads, runoff, evaporation and wildfire density. Each variable was grade consulting the experts and a multi-criteria decision rule was performed to integrate them in a map. Potential for RWH that met most of the criteria established are found in north and south of the study area. The conclusions are that the identification of suitability places with the proposed method is a useful tool to establish RWH. Expert knowledge and field visit could be helpful to select the best place and design for RWH systems, reducing cost and environmental impacts.

*Key words:* Multicriteria analysis, wildfire fighting, curve number, wildfire density, runoff, wind speed.

## **INTRODUCCIÓN**

México, al igual que otros países, se ha visto impactado por la creciente ocurrencia de incendios y megaincendios forestales, acrecentados por los efectos del cambio climático global, ya que en promedio se presentan 10 521 incendios cada año afectando unas 292 701 ha (SEMARNAT, 2012); asimismo, los años de mayor siniestralidad en la historia reciente del país han sido 1998 (Rodríguez *et al.*, 2000) y 2011, con 849 632 y 956 405 ha afectadas, respectivamente. Tales años también representaron fuertes temporadas de incendios para el estado de México, con 25 847 y 9284 ha, entidad que ha sido históricamente la más afectada por numerosos incendios con un total de 27 318 para el periodo 1996 – 2011, dañando importantes ecosistemas de pastizales, arbustos, matorrales así como reforestaciones y arbolado adulto. PROBOSQUE (Promotora de Bosques del Estado de México) (2011) ha identificado como una zona de alto riesgo a la región del Izta-Popo, en donde destacan los municipios de Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca en cuanto a



número y superficie afectados por incendios. Para hacer frente a la temporada de incendios, entre otras actividades, se lleva a cabo el control aéreo para lo cual se dispone de dos helicópteros, el Augusta 119 tipo Koala (PROBOSQUE, 2007) y el Bell 205 o Bell 212; es importante añadir que, el control aéreo se emplea particularmente en incendios de gran magnitud (a partir de 5 ha) e intensidad o con acceso restringido, donde el uso de las aeronaves se hace muy necesario. Sin embargo, la eficiencia del control aéreo de incendios es limitada ante a la carencia de fuentes de agua cercanas así como por el tiempo de bombeo y el recorrido de la aeronave al sitio de la conflagración.

Los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL), describen a todos los métodos para concentrar, almacenar y coleccionar el escurrimiento proveniente del agua de lluvia (De Winnaar *et al.*, 2007), estos sistemas se utilizaron a través de la historia por diversas civilizaciones; no obstante, fueron casi olvidados en la era de la alta urbanización (Burkhard *et al.*, 2000); hoy en día, se reconoce su versatilidad para resolver los problemas de escasez de agua, aunque su localización puede depender de numerosos factores, por lo cual los sistemas de información geográfica (SIG) se han recomendado como herramientas para enfrentar esta complejidad (Mbilinyi *et al.*, 2007); numerosos estudios se han emprendido para determinar la aptitud de los territorios a fin de ubicar SCALL y garantizar su buen funcionamiento (Zeyad, 2001).

Durga Rao y Bhaumik (2003) construyeron un sistema espacial experto en un ambiente SIG a fin de identificar la aptitud del territorio para construir estructuras de almacenamiento de agua; De Winnaar *et al.*, (2007) desarrollaron un método apoyado en SIG para identificar sitios de captación de escurrimientos superficiales, integrando diversas variables y modelando las respuestas hidrológicas; Sekar y Randhir (2007) diseñaron una propuesta espacial para ubicar sitios de captación del agua de lluvia con fines de recarga de acuíferos, incorporando además evaluaciones económicas; Mohtar *et al.*, (2006) presentaron una estructura de redes en SIG para ubicar reservorios en una cuenca local. En resumen, con la evolución de los SIG se ha facilitado identificar la aptitud de los territorios para establecer los SCALL, de manera que el uso de esta tecnología puede aplicarse con facilidad en cualquier territorio.

Los objetivos del presente estudio son: a) la selección y tratamiento geográfico mediante SIG de las variables que condicionan la localización del SCALL y b) la ponderación e integración de estas variables mediante un proceso jerárquico participativo y un método multicriterio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

Se encuentra en el oriente del estado de México, en las estribaciones de la Sierra Nevada, comprende los municipios de Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca en la zona oriente del estado de México (Figura 1) y cuenta con una superficie de 70 668.09 ha.

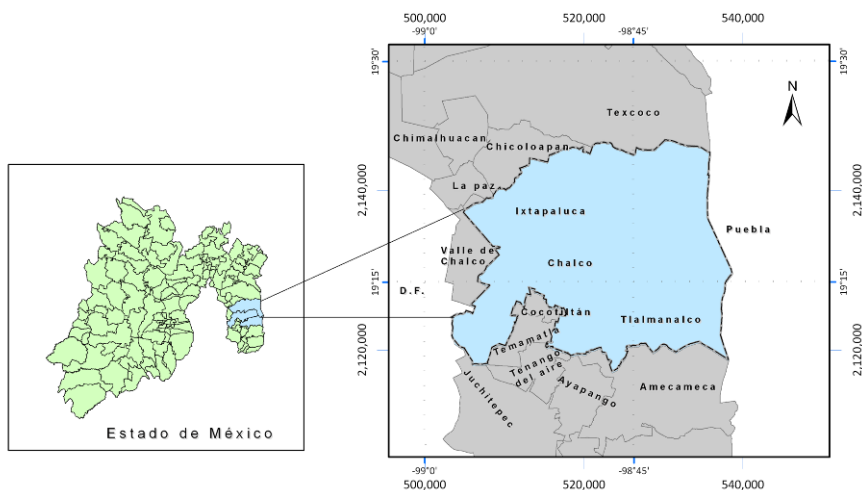


Fig. 1 Localización del área de estudio.

La altitud varía de 2500 a 5200 m de oeste a este; la temperatura media anual oscila entre los 10° C y 18° C, la precipitación pluvial promedio anual se registra entre los 377 y los 771 mm. Los suelos en las áreas de planicie y lomeríos son phaeozem, luvisoles, gleysoles, regosoles y solonchacks, en las partes más altas son litosoles, cambisoles y andosoles. La vegetación es de pinar de altura (*Pinus harwegii*), bosque de oyamel y zacatonales subalpinos, en las partes altas, así como bosques de pino, encino, matorrales y pastizales; las áreas agrícolas de temporal están sembradas con maíz, trigo, haba, frijol y frutales; se encuentran también áreas menores de agricultura de riego destinada al cultivo de hortalizas y el uso de suelo urbano al oeste de los municipios de Chalco e Ixtapaluca.

### Selección de variables

Se seleccionaron, en primera instancia, las variables más importantes en el carguío de agua para un helicóptero y funcionalidad del SCALL en el control de incendios forestales, de acuerdo con

Escamilla *et al.* (2010), entrevistas con el coordinador de vuelo de la CONAFOR (Com. Pers)<sup>4</sup>, quien cuenta con más de seis años de experiencia, y estudios afines (Dai-Ré Tenreiro, 2003; Ramakrishnan *et al.*, 2009; Weerasinghe *et al.*, 2010), las cuales se enuncian a continuación: a) velocidad de viento; b) densidad de incendios; c) cercanía a caminos; d) visibilidad (niebla); e) temperatura del aire; f) altitud; g) escurrimiento superficial, h) pendientes; e i) evaporación.

La información sobre las variables requeridas para el estudio se obtuvo a partir de las siguientes fuentes: a) datos de velocidad de viento a partir de ocho Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), seis con dos años de registro, dos más con tres y seis años de registro, respectivamente; b) Modelo de Elevación Digital (DEM), de 25 m de píxel proporcionado por la CONAGUA; c) registros de niebla, temperatura, evaporación y precipitación pluvial, estas dos últimas de 21 estaciones meteorológicas con registro de 9 a 39 años, obtenidas del Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III); d) historial de incendios forestales para el periodo 2005 – 2010 con georreferencia, de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR); e) imágenes SPOT 5 (Système pour l’Observation de la Terre) del año 2010; f) cartas edafológicas escala 1:50 000 del Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI); g) ArcView 3.2 y Arc Gis 9.2, como sistemas de información geográfico.

#### Tratamiento de variables

Después de un análisis detallado de la información y de entrevistas con el coordinador de vuelo de la CONAFOR, las variables de visibilidad, temperatura del aire, pendiente y altitud fueron descartadas por las siguientes razones: a) la zona de estudio presentó sólo 22 días con niebla en promedio por lo que no es una limitante; b) en el caso de la temperatura, se han realizado vuelos en condiciones de 0°C y a temperaturas menores sin contratiempo; y c) la pendiente y altitud obtuvieron un valor de ponderación mínimo.

Las variables restantes fueron procesadas en el SIG generando mapas y valores para cada una de ellas de la manera siguiente:

---

<sup>4</sup> Félix Moreno Pichardo. Coordinador Aéreo. CONAFOR, Estado de México. Km. 43.5, Carretera México Toluca, Campamento Forestal. Ocoyoacac, Estado de México. Tel. 01 728 28 23 456.

a) Velocidad de viento: esta variable es un factor de riesgo para el carguío de agua por el helicóptero cuando las velocidades son mayores a  $50 \text{ km h}^{-1}$ . Por otra parte, la calidad de los estudios de vientos se sustenta en el número de años de registro, considerándose 10 años como mínimo (Simiu, 1978). En México estos datos están limitados por disponibilidad y periodo de medición (López L. *et al.*, 2008).

A fin de integrar el mapa de velocidad de viento se localizaron ocho EMAS en el área de estudio. Se obtuvieron las medias aritméticas de los meses de la temporada de incendios (diciembre a julio). Las EMAS se referenciaron geográficamente (UTM - WGS84 – Zona 14) en Arc Gis 9.2 y se aplicó a las estaciones el método de interpolación IDW (*Inverse Distance Weighting, inverso de la distancia ponderada*). Se utilizó un tamaño del píxel de 30 x 30 metros con un factor de ponderación de 2, radio de búsqueda variable y un número de puntos de 3. El mapa de vientos, se reclasificó de acuerdo con la escala de Beaufort, en kilómetros/hora, que mide la intensidad de los vientos y es ampliamente usada en estudios de esta naturaleza.

b) Densidad de incendios: el sitio de ubicación del SCALL debe tener proximidad a las áreas de mayor concentración de incendios a fin de alcanzar una mejor eficiencia en el control. El mapa de densidad de incendios se generó a partir de 456 registros en la zona de estudio, para el periodo 2005 – 2010 empleando el módulo “*point density*” de ArcGis 9.2 (De la Riva *et al.*, (2004); Vilar del Hoyo, 2007).

c) Cercanía de caminos: la cercanía de los caminos al sitio del SCALL facilita las tareas de transporte de materiales, el pronto arribo de las brigadas y el mantenimiento del sistema. Los caminos se digitalizaron sobre imágenes SPOT 5 y se aplicó sobre estos el módulo de distancia euclidiana en Arc GIS 9.2 a fin de generar intervalos de distancias verticales en metros.

d) Escurrimiento superficial: se calculó con el método de Número de Curva (NC), propuesto por el USDA Soil Conservation Service (SCS) (Dai-Ré Tenreiro, 2003), aplicando la expresión siguiente:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8 S}$$

Donde:

Q = escurrimiento superficial en mm

P = precipitación pluvial promedio anual o ajustada a una función de distribución para un determinado periodo de retorno

S = relaciona al complejo suelo – cubierta vegetal y está en función de las curvas numéricas

La precipitación se procesó de acuerdo con la metodología propuesta por Campos (1998) de la manera siguiente:

a) Se calculó para cada estación meteorológica la longitud de registro necesaria para que la media de los datos de precipitación pluvial contara con una probabilidad del 90%.

b) Se ajustaron los valores de lluvia a funciones de distribución y posteriormente fue calculado el periodo de retorno para 1.1 años a fin de garantizar una probabilidad del 90% en la oferta de precipitación.

El grupo hidrológico se asignó a cada unidad de suelo con base en los cuadros propuestos por el USDA SCS; la cubierta vegetal, se obtuvo a partir de la actualización de linderos de una cobertura del año 2008 con apoyo de imágenes SPOT 5 del año 2010, se clasificó por su condición hidrológica. Ambas coberturas se sobrepusieron en el programa ArcView 3.2 y se les asignó el NC correspondiente, según el grupo hidrológico y los usos de suelo y vegetación.

El cálculo de la humedad antecedente se efectuó sólo para la tipo II, cuya clase va de 12.7 a 38.1 mm y también es llamada condición media, que ha sido sugerida para avenidas de diseño en embalses pequeños (Ramakrishnan *et al.*, (2009) o cuando se prevé poca variación del dato en razón por la escasez de estaciones meteorológicas (Ramakrishnan *et al.*, 2009).

El método de NC se aplicó de manera distribuida, empleando el módulo de *Map Calculator* de Arc View 3.2; es decir, los cálculos se efectuaron con valores de precipitación específicos por píxel, no con un valor promedio para toda el área. El escurrimiento superficial se multiplicó por la superficie de cada celda ( $900 \text{ m}^2$ ) para obtener el resultado en metros cúbicos.

e) Evaporación: se emplea para cuantificar las pérdidas que se presentan en el SCALL (Dai-Ré Tenreiro, 2003). Para su cálculo se interpolaron los valores promedios anuales por el método de IDW en Arc Gis 9.2.

## Elaboración del mapa de aptitud territorial

Los mapas de las cinco variables fueron reclasificados en cuatro categorías, para favorecer un resultado expresado de manera continua, donde la categoría cuatro representa la óptima buscada para cada caso. Las variables de densidad de incendios, escurrimiento superficial, evaporación, velocidad de viento y distancia a caminos fueron priorizadas de acuerdo con el experto y sus valores de ponderación que enseguida se indican, se obtuvieron a partir del método de suma y recíproco (SEMARNAT - INE, 2006): 0.33, 0.27, 0.20, 0.13 y 0.07, respectivamente. La integración de los mapas se realizó por combinación lineal ponderada (Bojórquez-Tapia *et al.*, 2003), como indica la siguiente expresión:

$$a_j^k = \sum_i^n W_{ij} W X_{ij}^k$$

Donde:

a = valor de aptitud de la alternativa k, para el problema j

W = peso de importancia asignado para el atributo i por el problema j

X = valor que toma la variable de decisión binaria que representa el atributo i, que condiciona el objetivo del sector j

El mapa de aptitud se estandarizó en una escala de 0 a 10 para facilitar la interpretación de los resultados; donde, 0 representa la mínima aptitud y 10, es la máxima.

## RESULTADOS

Se elaboraron mapas en Arc Gis 9.2 para las cinco variables seleccionadas:

a) Velocidad de viento: las velocidades más intensas se encontraron en las áreas de mayor altitud al noreste y las velocidades menores se encontraron en las partes más bajas, al suroeste. La zona óptima para la localización de los SCALL es del 48.39% del área de estudio, en donde las velocidades de viento son de 29 a 38 km h<sup>-1</sup> y de 39 a 49 km h<sup>-1</sup> clasificadas como viento fresco y brisa fresca en la escala de Beaufort y agrupadas en la clase 4. En el 51.60% del área se

presentan vientos de tipo viento muy duro (75 a 88 km h<sup>-1</sup>), temporal (89 a 102 km h<sup>-1</sup>) y tipo borrasca 103 - 117 km h<sup>-1</sup> (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clases, superficies y priorización de la variable velocidad de viento.

Variable	Priorización	Clases (km/h)	Superficie (ha)	Ocupación en el territorio (%)
Velocidad de viento	1	75 - 117	28 269.53	40.00
	2	62 - 74	8200.26	11.60
	3	50 - 61	13 832.61	19.57
	4	29 - 49	20 365.70	28.82
			<b>70 668</b>	<b>100</b>

b) Distancia a caminos: la proximidad de los caminos al sitio de emplazamiento del SCALL es un elemento clave para facilitar su construcción, operación, mantenimiento y vigilancia. El área de estudio presentó, en poco más del 94% de su superficie, distancias de 0 a 1000 m que fueron elegidas como óptimas (Cuadro 2). Sólo, 0.64% del territorio quedó comprendido con distancias superiores a los 2000 m.

Cuadro 2. Clases, superficies y priorización de la variable distancia a caminos.

Variable	Priorización	Clases (m)	Superficie (ha)	Ocupación en el territorio (%)
Distancia a caminos	1	2000-2500	453.15	0.64
	2	1500-2000	786.96	1.11
	3	1000-1500	2348.46	3.32
	4	0-1000	67 078.62	94.92
			<b>70 668</b>	<b>100</b>

c) Escurrimiento superficial: a partir del mapa de escurrimiento se identificó al sur del municipio de Tlalmanalco con los mayores volúmenes; en contraste, al norte se localizaron las aportaciones más escasas, en las comunidades de Coatepec y San Francisco, municipio de Ixtapaluca (Figura 3). La categoría de 415 - 667 m<sup>3</sup> se seleccionó como óptima, dado que alberga las mayores aportaciones (Cuadro 3).

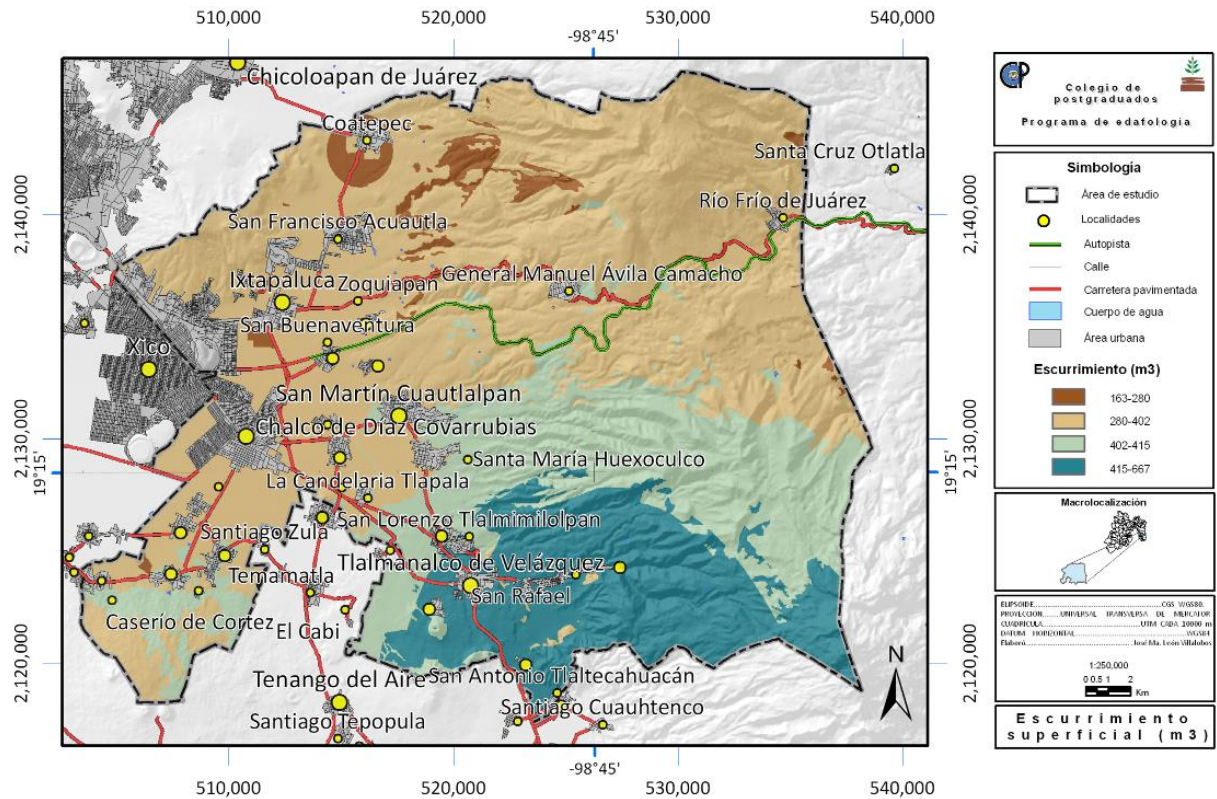


Figura 2. Mapa de escurrimiento superficial.

Cuadro 3. Clases, superficies y priorización de la variable escurrimiento superficial.

Variable	Priorización	Clases	Superficie	Ocupación en el territorio
Escurrecimiento Superficial		(m <sup>3</sup> )	(ha)	(%)
	1	163 - 280	1836.24	2.60
	2	280 - 402	41 958.08	59.45
	3	402- 415	15 346.02	21.74
	4	415 – 667	11 432.91	16.20
			<b>70 668</b>	<b>100</b>

Es importante añadir que los NC asignados guardan relación directa con los valores de escurrimientos presentados y responden a la diversidad de usos de suelo y las condiciones edáficas de la zona (Figura 4).



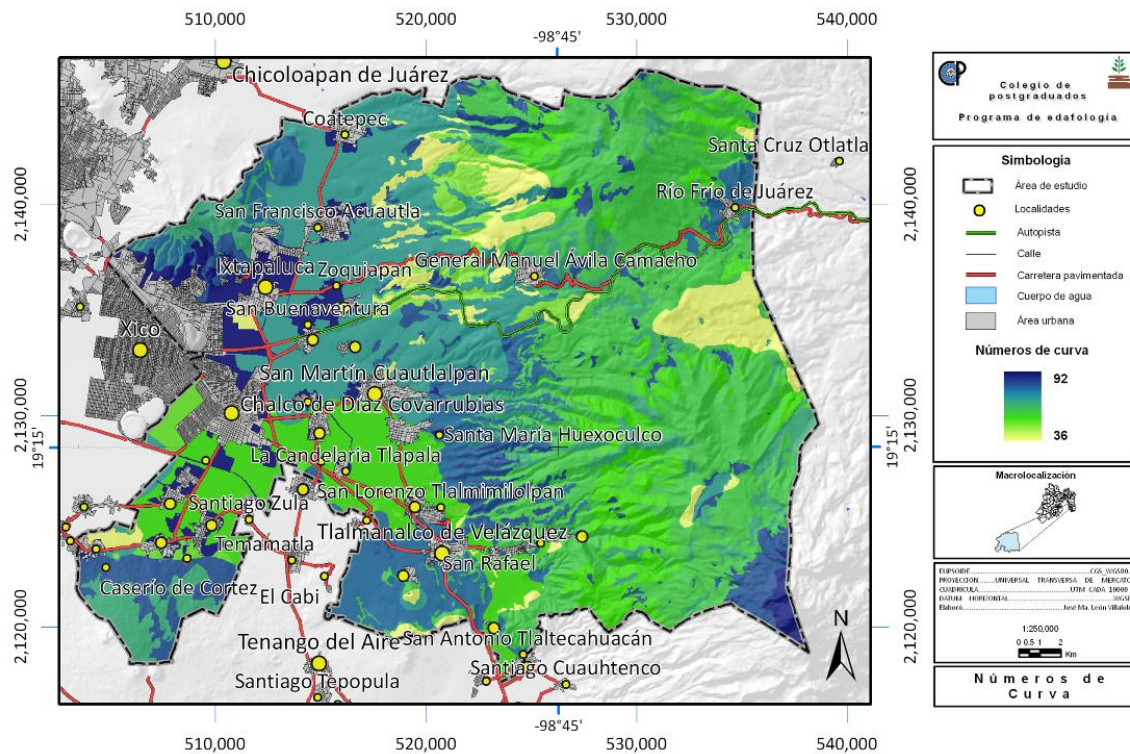


Figura 3. Mapa de números de curva por unidad de suelo y tipo de vegetación.

d) Evaporación: se encontraron valores comprendidos entre los 1080 y 1968 mm como promedio anual (Cuadro 4). La clase 1080 – 1968 mm, ocupó el 47.32% de la superficie y se seleccionó como la deseable para establecer el SCALL. Los valores más intensos de evaporación, 1745 - 1968 mm, se encontraron en las zonas urbanas del área de estudio.

Cuadro 4. Clases, superficies y priorización de la variable evaporación

Variable	Priorización	Clases	Superficie	Ocupación en el territorio
Evaporación		(mm)	(ha)	(%)
	1	1745 - 1968	13 390.56	18.95
	2	1524 - 1745	12 738.51	18.03
	3	1302 - 1524	11 103.03	15.71
	4	1080 - 1302	33 437.79	47.32
			<b>70 668</b>	<b>100</b>

d) Densidad de incendios: con relación a la densidad de incendios, se encontraron de 0 a 3.3 incendios  $\text{km}^{-2}$ . Dado que es deseable la mayor cercanía entre el SCALL y el origen de los incendios, se seleccionaron las densidades de 2.4 hasta 3.3 como adecuadas, mismas que se

encuentran en el 4.31% del territorio (Cuadro 5). La clase mejor representada fue de 0 a 0.8 incendios  $\text{km}^{-2}$ .

Cuadro 5. Clases, superficies y priorización de la variable densidad de incendios.

Variable	Priorización	Clases	Superficie	Ocupación en el territorio
Densidad de incendios		(incendios/ $\text{km}^2$ )	(ha)	(%)
	1	0-0.8	55 193.72	78.10
	2	0.8-1.6	6949.52	9.83
	3	1.6-2.4	5484.25	7.76
	4	2.4-3.3	3043.71	4.31
			<b>70 668</b>	<b>100</b>

El potencial en el territorio para establecer SCALL destinados al control de incendios forestales (Figura 4) presenta una aptitud máxima (10) en sólo 0.12% del territorio; con aptitud 9, se encuentra poco más del 8%; mientras que con aptitud 8 se tiene al 20.17%; la mayor parte de la superficie, 30.49%, se ubicó en la categoría cinco (Cuadro 6). Por otra parte, la distribución de las áreas con aptitud 10, 9 y 8 se localizó hacia el noreste, en el municipio de Ixtapaluca, y hacia el sur, cercano a la cabecera municipal de Tlalmanalco.

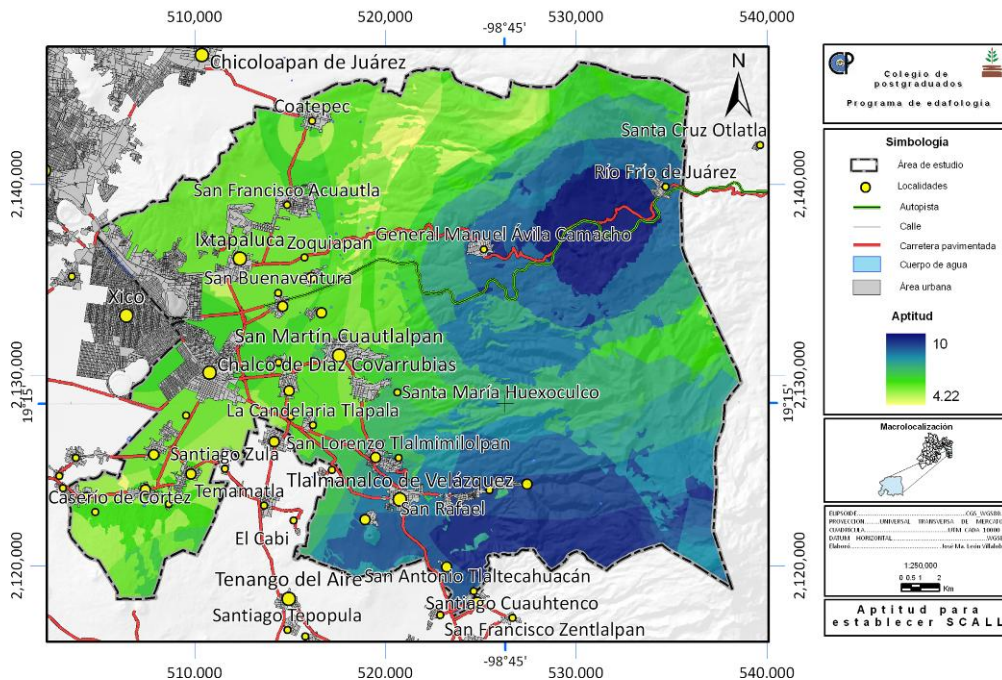


Figura 4. Aptitud territorial para SCALL contra incendios forestales.

Cuadro 6. Superficie de cada categoría de aptitud encontrada en el área de estudio.

Escala de aptitud	Superficie	Representación en el territorio
	(ha)	(%)
4	939.51	1.33
5	21 512.43	30.49
6	13 579.11	19.24
7	14 383.71	20.39
8	14 229.45	20.17
9	5829.93	8.26
10	85.86	0.12
	70 668	100%

## DISCUSIÓN

La presente investigación difiere de otras, que con un esquema similar, recurren típicamente al análisis de dos variables: a) escurrimiento superficial, aplicando el método de curvas numéricas (Gutpa *et al.*, 1997) y b) pendientes (Mbilinyi *et al.*, 2007); con lo cual simplifican la selección de criterios, según observan (Gutpa *et al.*, 1997; Mbilinyi *et al.*, 2007; Stuebe y Johnston, 2007). Otros esfuerzos, consideran variables como el tipo y profundidad del suelo, vegetación y usos del suelo, así como la precipitación pluvial de la zona (Stuebe y Johnston, 2007); sin embargo, estas variables forman parte del método para determinar el escurrimiento superficial.

No obstante la importancia que le otorgan la mayoría de los estudios a la variable pendiente, ésta fue descartada del modelo debido a su valor de ponderación con baja significancia y el escaso impacto que tendría en el resultado de aptitud. En cambio, Gutpa *et al.*, (1997) indican que la pendiente es un factor clave para seleccionar sitios destinados a la captación de agua de lluvia, por la influencia directa que tiene sobre la cantidad de escurrimiento. Empero, esta afirmación alcanza una mayor validez cuando la variable se analiza “*in situ*” y no a una escala regional como es el caso. Asimismo, la altitud fue también eliminada del modelo, pues el control aéreo de incendios se ha realizado con eficiencia en condiciones mayores a 4,000 m; por otro lado, en la zona de estudio no se han registrado incendios mayores a 5 ha en altitudes superiores.

El escurrimiento superficial, el cual se integró al modelo, presentó en el mapa una gran variabilidad, 163 a 667 m<sup>3</sup>; así por ejemplo, la zona noreste mostró números de curva (NC) altos (70, 73 y 86) y consiguientes volúmenes de escurrimiento importantes (415 a 667 m<sup>3</sup>), los cuales se relacionaron con suelos regosoles y precipitaciones pluviales considerables (600 mm anuales). En otros casos, los pastizales, el uso agrícola de mala condición hidrológica y la ausencia de vegetación, con estos mismos suelos o suelos del grupo C dieron también como resultado grandes volúmenes de escurrimiento superficial. Estas relaciones fueron igualmente observadas por Sekar *et al.* (2007) en un estudio similar, donde los tipos de suelo y su capacidad de infiltración afectaron de manera directa los valores de las curvas numéricas y subsecuentes valores de escurrimiento.

En ciertas propuestas metodológicas, las distancias a los SCALL para usos agrícolas se definen entre 1000 y 2000 m (De Winnaar *et al.*, 2007) obteniéndose buenos resultados; en contraste, para la propuesta aquí presentada se requiere la mayor cercanía a los caminos; en tal sentido, la clase cuatro elegida como óptima guardó una relación positiva con la máximas aptitudes en razón de la amplia red de caminos y carreteras cercanas las zonas de incendios.

Por otro lado, los sitios encontrados como óptimos en el mapa de aptitud para establecer SCALL destinados al control de incendios forestales responden, por un lado, a los valores individuales de ponderación de cada variable, y por el otro, a las clases óptimas elegidas para cada una; tal es el caso de las variables densidad de incendios, escurrimiento superficial y evaporación, que definieron los sitios con aptitud en la zona norte. Este comportamiento de las variables fue también encontrado por Weerasinghe *et al.* (2010), cuyos sitios potenciales para construir SCALL y tecnologías de almacenamiento de agua, dependieron de los valores de ponderación relativos y las clases óptimas seleccionadas para cada variable. En cambio, se presentó una relación negativa con la variable velocidad de viento, en la zona norte; es decir, la clase con mayor velocidad de vientos coincidió con la de mayor aptitud para establecer SCALL; este hecho puede coincidir con lo observado por (Simiu, 1978), quien indica que las estaciones meteorológicas con registros menores a 10 años no cuentan con información suficiente para producir resultados veraces; asimismo, la baja representatividad de las EMAS en la zona de estudio puede resultar, una vez efectuada la interpolación, en generalizaciones poco acertadas de los valores de velocidad para un sitio puntual. Con la variable densidad de incendios, también se

observó una relación negativa en la zona sur, que cuenta con una baja densidad de incendios; sin embargo, estos pocos incendios han afectado grandes superficies.

Si bien pueden existir otros factores a considerar en un análisis de esta naturaleza, tales como la respuesta de la comunidad al plan, financiamiento, impacto ambiental, relieve o el área de la cuenca; éstas pueden ser validadas sobre el sitio de establecimiento del SCALL, en función de las condiciones del terreno y del diseño de la estructura (De Winnaar *et al.*, 2007; Sekar y Randhir, 2007; Ramakrishnan *et al.*, 2009).

## CONCLUSIONES

La presente investigación evaluó la capacidad territorial en tres municipios de la zona oriente del estado de México, para establecer SCALL destinados al control aéreo de incendios forestales, conjuntando variables que afectaban directamente el carguío de agua por parte del helicóptero y las de naturaleza hídrica, a través de un método de evaluación multicriterio en SIG.

La integración de las diferentes variables mediante el método de combinación lineal ponderada permitió identificar en poco más del 28% del área de estudio buenas aptitudes para albergar SCALL, concentrándose en dos zonas: al norte, en el municipio de Ixtapaluca, y al sur, en el municipio de Tlalmanalco. Las variables analizadas respondieron, en su mayoría, con una relación positiva; sólo la velocidad de viento y la densidad de incendios no fueron congruentes con los valores de aptitud mostrados por el conjunto de variables. En el caso de la velocidad de viento, esta relación negativa pudo deberse a la ausencia de registros suficientes y limitada representatividad de las EMAS.

La aptitud identificada provee un marco útil para los tomadores de decisiones en materia forestal; no obstante, en futuras investigaciones se pueden considerar como variables sólo a los incendios con superficies impactadas mayores a 5 ha o los menos accesibles, que son los que generalmente requieren de la participación de las aeronaves; igualmente, dado que la tasa de escurrimiento superficial, en el contexto de los SCALL, depende cada vez menos de las condiciones naturales (suelo y vegetación) gracias a los recursos tecnológicos de los que hoy día se disponen (impermeabilización de laderas), esta variable puede ser sustituida por el análisis de las precipitaciones pluviales. A lo anterior, se tendrán que sumar también elementos económicos y sociales que permitan decidir sobre el tipo de estructura (diseño) que sea más costeable y cause

el menor impacto ambiental. Asimismo, se sugiere que la presente propuesta se integre al marco de la política forestal, de manera que existan incentivos económicos para la construcción de estos sistemas y reducir el número de superficies forestales impactadas por los regímenes alterados del fuego, salvaguardando con ello la diversidad ecológica de la zona.

## REFERENCIAS

- Anaya G., M. 2011. Captación del agua de lluvia: solución caída del cielo. Ed. Colegio de Postgraduados –Mundi Prensa. México, D.F. 132 p.
- Bojórquez – Tapia, L. A., L. P. Bower, G. Castilleja, S. Sánchez-Colón, M. Hernández, W. Calvert, S. Díaz, P. Gómez-Priego, G. Alcantar, D. Melgarejo, M. Solares, L. Gutiérrez and M. Juárez. 2003. Mapping expert knowledge: redesigning the monarch butterfly biosphere reserve. *Conservation Biology*. 17 (2): 367-379.
- Burkhard, R., A. Deletic and A. Craig. 2000. Techniques for water and wastewater management: a review of techniques and their integration in planning. *Urban Water*. 2 (3):197-221.
- Campos A., D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 556 p.
- Dai-Ré Tenreiro, R. 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España. 385 p.
- De La Riva, J., F. Pérez - Cabello, N. Lana-Renault and N. Koutsias. 2004. Mapping wildfire occurrence at regional scale. *Remote Sensing of Environment*. 92 (2):363-369.
- De Winnaar, G., G. P. W. Jewitt and M. Horan. 2007. A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 32 (3):1058-1067.
- Durga Rao, K. H. V. and M. K. Bhaumik. 2003. Spatial expert support system in selecting suitable sites for water harvesting structures "A case study of song watershed, Uttaranchal, India". *Geocarto International*. 18 (4):43-50.
- Escamilla G., J. Pérez P. y L. Valenzuela P. 2010. La brigada de helitanque y los procedimientos de trabajo con helicópteros. Corporación Nacional Forestal. Santiago de Chile, Chile. 52 p.

- Gutpa, K. K., J. Deelstra and K. D. Sharma. 1997. Estimation of water harvesting potencial for a semiarid area using GIS and remote sensing. (242). [http://iahs.info/redbooks/a242/iahs\\_242\\_0053.pdf](http://iahs.info/redbooks/a242/iahs_242_0053.pdf) (22 de febrero de 2012).
- López L., J., C. González G. y M. E. Zermeño De L. 2008. Estadística preliminar de los vientos para la zona urbana de Aguascalientes. *Investigación y Ciencia*. 16 (41): 20-27.
- Mbilinyi, B. P., S. D. Tumbo, H. F. Mahoo and F. O. Mkiramwinyi. 2007. GIS - based decision support system for identifying potential sites for rainwater harvesting. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 32 (16):1074-1081.
- Mohtar, H. R., T. Zhai, J. Y. Choi, B. Adrian, M. Ouessar, F. Abdelli and E. Bernard. 2006. Web - based GIS - Hydrologic Modeling for Siting Water Harvesting Reservoirs (ISCO 2006). <http://www.vulgarisation.net/isco2006/1/T1-MohtarWeb%20Based%20GIS%20Hydrological%20Modeling-USA.pdf> (19 de enero de 2012).
- Promotora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). 2007. Combatirán incendios por aire. Toluca, Estado de México [en línea]. Disponible en <http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/inicio/index.htm> (Consultado el 20 de enero de 2012).
- Promotora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). 2011. Probosque en alerta durante la temporada de estiaje (6). <http://www.forestalxxi.com/index.php?option=comcontent&view=article&id=243:probosque-en-alerta-durante-la-temporada-de-estiaje&catid=76:probosque&Itemid=70> (20 de enero de 2012).
- Ramakrishnan, D., A. Bandyopadhyay and K. Kusuma. 2009. SCS - CN and GIS - based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed, Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science*. 118 (4):355-368.
- Rodríguez T., D. A., M. Rodríguez. A., y F. Sanchez. F. 2000. Educación e incendios forestales. Editorial Mundi-Prensa. México, D.F. 201 p.
- Sekar, I. and T. O. Randhir. 2007. Spatial assessment of conjunctive water harvesting potential in watershed systems. *Journal of Hydrology*. 334 (2):39-52.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). Recursos forestales. ([http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/aproot/dgeia\\_mce/html/mce\\_index.html](http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/aproot/dgeia_mce/html/mce_index.html)) (22 de febrero de 2012).

- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales) – INE (Instituto Nacional de Ecología). Manual del proceso de ordenamiento ecológico. 2006. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 335 p.
- Simiu, E. 1978. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering. John Willey and Sons. New York, E.U. 589 p.
- Stuebe, M. M. and D. M. Johnston. 2007. Runoff volume estimation using GIS techniques. Journal of the American Water Resources Association. 26 (4):611–620.
- Vilar del Hoyo. 2007. Análisis comparativo de diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales. Análisis comparativo de diferentes métodos para la obtención de modelos de riesgo humano de incendios forestales (1). [http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo\\_et\\_al\\_SPAIN.pdf](http://www.geogra.uah.es/firemap/pdf/VilardelHoyo_et_al_SPAIN.pdf) (20 de enero de 2012).
- Weerasinghe, H., U. Schneider and A. Löw. 2010. Water harvest and storage location optimization model using GIS and remote sensing (1). [http://balwois.com/balwois/administration/full paper/ffp-1653.pdf](http://balwois.com/balwois/administration/full%20paper/ffp-1653.pdf) (5 de febrero de 2012).
- Zeyad, M. 2001. Using remote sensing approach and surface landscape conditions for optimization of watershed management in Mediterranean regions. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 36 (6):213-220.



**CAPÍTULO 4. RED DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA PARA EL CONTROL AÉREO DE INCENDIOS FORESTALES**

## **RED DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA PARA EL CONTROL AÉREO DE INCENDIOS FORESTALES**

José María León Villalobos,<sup>1</sup> Manuel Anaya Garduño,<sup>1</sup> José Luis Oropeza Mota,<sup>1</sup> Enrique Ojeda Trejo,<sup>1</sup> Dante Arturo Rodríguez Trejo<sup>2</sup> y Jorge Luis García Rodríguez<sup>3</sup>

### **RESUMEN**

Los helicópteros se han convertido en el medio más eficaz, rápido y moderno en la lucha contra los megaincendios forestales; en particular los de gran magnitud; la disponibilidad de agua en áreas cercanas a los incendios es un aspecto operativo fundamental. Los sistemas de captación del agua de lluvia (SCALL) son una alternativa para solucionar la escasez de agua en el control aéreo de los incendios forestales. En el presente estudio se diseñó un SCALL en la zona oriente del estado de México con base en la estimación de la demanda de agua requerida para controlar el 10 % de los incendios que se han presentado en el área con superficies afectadas a partir de 5 ha y el cálculo de la Precipitación Neta con probabilidad de ocurrencia del 80%. Para el Área de Captación se recurrió al método de impermeabilización de laderas y en el diseño de los sistemas de almacenamiento se empleó la Precipitación Máxima al 90% de probabilidad. Los sitios de ubicación de los SCALL se identificaron con éxito a partir del conocimiento local, la aptitud territorial y una evaluación de campo. La Red de SCALL se configuró con los sitios identificados considerando una distancia de 10 km lineales respecto de la fuente de los incendios y una separación entre los sistemas de captación de 5 km. Se consideraron también en el diseño otros parámetros de funcionalidad como son: señalización y coordenadas de los sitios. Debido a que los sitios de ubicación de los SCALL se encuentran en un Área Natural Protegida se propuso una rampa de seguridad en cada sistema de almacenamiento para facilitar la salida de las aves cuando el depósito permanezca abierto.

Palabras clave: Área de captación, conocimiento local, precipitación neta, probabilidad de lluvia, sedimentadores, sistema de almacenamiento.

<sup>1</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Correo e: jomalevi@yahoo.com.mx

<sup>2</sup> División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

<sup>3</sup> Subgerencia de inventario y monitoreo de suelos forestales. Comisión Nacional Forestal.

## **ABSTRACT**

Aircrafts are the most effective, fast and modern techniques to fight forest fires and water is essential, but is limited, reducing the efficiency of the practice. Rain Water Harvesting (RWH) systems are able to improve water availability for aero tech forest fire fighting. In this study, a RHW design was carried out for this purpose in the east of Mexico state, Mexico, Net Precipitation with 80% probability occurring was estimated, a PVC membrane waterproofing up slope technique was selected as catchment area. In order to prevent sedimentation on the storage systems, a sedimentation basin was proposed, for designing the storage system, maximum precipitation with 90% probability was used, offering a very wide safe threshold. Previously, potential sites for RWH were identified, with good results, employing local knowledge, a GIS land suitability methodology and a field survey. Finally, a RWH network for aero tech fire forest fighting was set, potential sites were placed to 10 km from fire source and to 5 km to each other. Some operational parameters were added too, location signals, location coordinates and a ramp for birds in each storage systems for avoiding drowning when tanks remains opened.

*Key words:* Catchment area, local knowledge, net precipitation, precipitation probability, sedimentation basin, storage system.

## **INTRODUCCIÓN**

En México, los años más graves de siniestralidad por incendios forestales han sido 1998 y 2011 (Rodríguez *et al.*, 2000; SEMARNAT, 2011). En el estado de México, para estos mismos años se incendiaron 25 847 y 9284 ha, respectivamente y han sido también, los de mayor siniestralidad. Asimismo, es el estado históricamente la más afectado por incendios a nivel nacional, durante el periodo 1996 – 2011, con un total de 27 318, dañando importantes ecosistemas de pastizales, arbustos, matorrales así como reforestaciones y arbolado adulto. PROBOSQUE (Promotora de Bosques del Estado de México) (2011) ha identificado a la región del Izta-Popo como de alto riesgo de incendios, principalmente en los municipios de Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca en cuanto a número y superficie afectados por incendios.

Como parte del combate de los megaincendios forestales, en los últimos años la aviación se ha convertido en el medio más eficaz, rápido y moderno para enfrentarlos (Calabri, 1983). En México, la aeronave más empleada es el helicóptero como una herramienta que permite la prevención, localización y extinción de los incendios; en el estado de México se dispone de un helicóptero Augusta 119 tipo Koala con helitanque de 1200 L, propiedad del gobierno estatal (PROBOSQUE, 2007) y se renta un Bell 205 o un Bell 212 por parte del Gobierno Federal con Bambi Bucket ® de 1225 L.

Para la extinción eficiente de los incendios forestales mediante aeronaves la disponibilidad de fuentes de agua cercanas a las áreas incendiadas es fundamental; sin embargo, su disponibilidad en el ambiente forestal es limitada por su inexistencia y falta de acceso adecuado. El establecimiento estos sitios depende de la presencia de fuentes naturales (ríos, arroyos o manantiales) para recargarlos y mantenerlos con agua, en especial en épocas de estiaje donde los incendios se presentan con mayor frecuencia; en ocasiones es necesario recargarlos de manera artificial a pesar de las implicaciones de costos. Una alternativa es la construcción de puntos de almacenamiento de agua artificiales para abastecer las aeronaves y reducir los tiempos de desplazamiento y descarga.

Los Sistemas de Captación del Agua de Lluvia (SCALL), describen a todos los métodos que permiten concentrar, almacenar y coleccionar el escurrimiento proveniente del agua de lluvia (De Winnaar *et al.*, 2007). El diseño de una red SCALL para la zona oriente del estado de México ayudaría a solucionar el problema de escasez de agua para el abastecimiento de las aeronaves considerando parámetros como: macrolocalización, disponibilidad de superficie de captación, cálculo de la demanda de agua y oferta de la precipitación pluvial, requiriéndose del uso de técnicas y métodos innovadores para su análisis.

El CIDECALLI – CP (Centro Internacional de Demostración y Captación en Aprovechamiento del agua de Lluvia – Colegio de Postgraduados) y diversos investigadores han propuesto soluciones diversas para resolver el problema de escasez de agua mediante los SCALL. Juan (2006), en coordinación con el CIDECALLI – CP, diseñó un sistema de captación de agua de lluvia para consumo humano empleando con éxito la técnica de impermeabilización de laderas, para proveer de un área de captación suficiente y atender la demanda de agua de una comunidad Mazahua en el estado de México; Durga Rao y Bhaumik (2003) elaboraron un

sistema espacial experto en ambiente SIG para identificar la aptitud del territorio y construir estructuras de almacenamiento de agua; Mbilinyi *et al.*, (2005), desarrollaron un método, combinando conocimiento local, a través de herramientas participativas y criterios técnicos para identificar la mejor ubicación de SCALL de uso agrícola.

Las soluciones abordadas por los autores anteriores: SCALL, uso de SIG, métodos participativos y criterios técnicos se integraron en este trabajo para el diseño de una red de SCALL y ofrecer soluciones eficaces a los problemas de escasez de agua en el oriente del estado de México para el control aéreo de los incendios forestales..

Los objetivos del presente estudio son: a) el diseño de SCALL para el control aéreo de incendios forestales en los municipios de Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca y b) la conformación de una red de SCALL para la recarga del helicóptero de manera eficiente y oportuna para un mejor control de los incendios forestales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización y descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra en el oriente del estado de México, en la ladera este de la Sierra Nevada y abarca los municipios de Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca en la zona oriente del estado de México con una superficie de 70 668.09 ha (Fig. 1).

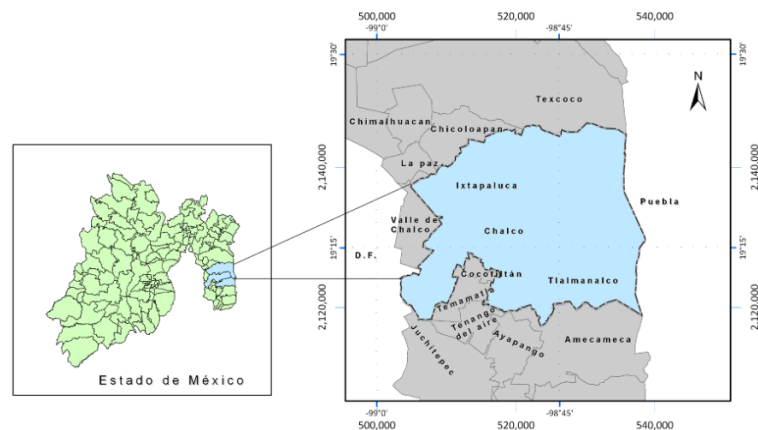


Fig. 1 Localización del área de estudio.

La sierra nevada es una cordillera volcánica con orientación N – S y una longitud de 70 kilómetros, el área de estudio se encuentra en la parte central de la misma en la ladera oriental, en el área de los cerros Tlaloc, Telapón y parte de la ladera del volcán Iztaccíhuatl. El relieve de

la ladera es abrupto y la altitud varía de 2500 a 5200 m de este a oeste. Lo anterior produce un gradiente altitudinal en temperatura y precipitación. La temperatura media anual oscila entre los 10° C y 18° C, la precipitación pluvial promedio anual se registra entre los 377 y los 771 mm de las partes más bajas a las más altas. Los suelos en las áreas de lomeríos son phaeozem, luvisoles, gleysoles, regosoles y solonchacks, en las montañosas dominan los litosoles, cambisoles y andosoles. La vegetación es de zacatonal subalpino y pino en las partes altas, mientras que los bosques de oyamel y encinos se encuentran en las partes de mayor pendiente; los matorrales, pastizales y las áreas agrícolas de temporal en las áreas con menor pendiente y lomeríos con cultivos de maíz, trigo, haba, frijol y frutales; se encuentran también áreas menores de agricultura de riego destinada al cultivo de hortalizas y el uso de suelo urbano al oeste de los municipios de Chalco e Ixtapaluca.

#### Metodología

Para el diseño de una red de SCALL para control aéreo de incendios forestales se requieren las siguientes determinaciones: 1) Selección de estaciones meteorológicas, 2) Precipitación Neta, 3) Demanda de agua, 4) Área efectiva de captación, 5) Volumen del sedimentador, 6) Volumen del sistema de almacenamiento, 7) Microlocalización de los sitios y 8) Criterios operativos para la red de SCALL.

La metodología para el cálculo de cada determinación se describe enseguida:

#### 1) Selección de estaciones y tratamiento los datos de precipitación pluvial

Se seleccionaron dos estaciones meteorológicas: 15018 Ávila Camacho y 15106 San Rafael Tlalmanalco de acuerdo con su influencia en el área de estudio; se aplicó la metodología propuesta por Campos (1998) para el cálculo de la longitud de registro y ajuste de los datos de lluvia a funciones de distribución: a) se calculó para cada estación meteorológica la longitud de registro necesaria (años acumulados necesarios) para que la media de los datos de lluvia contara con una probabilidad del 90%, b) se seleccionaron las funciones de distribución más adecuadas a los datos de lluvia con base sus coeficientes de variación y oblicuidad, y c) se determinó la

precipitación mensual con periodo de retorno de 1.25 años y probabilidad del 80% aplicando las ecuaciones de cada función distribución.

## 2) Precipitación Neta:

Para el cálculo de la Precipitación Neta se empleó la fórmula de Anaya (2011):

$$PN = P \times \eta$$

Donde:

PN = precipitación neta (mm).

P = precipitación al 80% de probabilidad (mm), obtenida en el inciso 1).

$\eta$  = eficiencia de captación del agua de lluvia, que se calcula de la manera siguiente:

$$\eta = Ce \times \text{Coeficiente de captación.}$$

Donde Ce = coeficiente de escurrimiento (adimensional). El Ce fue de 0.9, correspondiente a una cubierta de geomembrana, en tanto que el Coeficiente de captación fue del 0.85 (Anaya, 2011).

## 3) Cálculo de la demanda de agua

Para el cálculo de la demanda de agua se propuso la siguiente fórmula:

$$\text{Demanda} = \frac{AN (SI \times \%CAIF)}{1000}$$

Donde:

Demanda = demanda de agua para el control de incendios forestales (m<sup>3</sup>).

AN = agua necesaria, calculada en 10 000 L ha<sup>-1</sup>.

SI = superficie incendiada (ha), proveniente de un registro histórico y sólo para incendios a partir de 5 ha (el control aéreo de incendios se hace a partir de esta superficie).

% CAIF = porcentaje crítico de atención de incendios forestales definido en 10.

1000 = factor de conversión de litros a metros cúbicos.

En cada municipio del área de estudio se seleccionó el 10% de los incendios que afectaron superficies a partir de 5 ha, durante el periodo 2005 – 2010, de una base datos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR); este porcentaje se consideró como valor crítico de atención en el control aéreo de incendios en la zona.

El Agua Necesaria (AN) se estimó en 10 000 L para controlar un incendio de una hectárea de manera eficiente en la zona de estudio; el dato está basado en la experiencia operativa del coordinador de vuelo de incendios forestales de la CONAFOR (Com. Pers.)<sup>1</sup>.

El factor SI se calculó para cada municipio con base en el registro histórico de 2005 - 2010 (CONAFOR, 2010) a partir de los incendios que cubrieron superficies mayores de 5 ha. Esta superficie se consideró como el valor crítico de atención para apoyar con el control aéreo de incendios en la zona.

CAIF se fijó en 10%, como porcentaje de atención del total de los incendios forestales ocurridos en cada municipio.

#### 4) Cálculo del área efectiva de captación

El área efectiva de captación es la superficie donde el agua de lluvia cae y cuyas dimensiones garantizan, a partir de la precipitación neta, la cobertura de la demanda. Ésta se determinó por municipio, aplicando la siguiente ecuación propuesta por Anaya (2011):

$$A_{ec} = \frac{\text{Demanda anual}}{\sum_{j=1}^n PN}$$

Donde:

$A_{ec}$  = área efectiva de captación ( $m^2$ ).

Demanda anual ( $m^3$ ).

PN = precipitación neta (m).

Debido a que los sitios seleccionados para la ubicación de los SCALL se encuentran en su mayoría en el ANP Parque Nacional Iztapopo y a fin de provocar alteraciones mínimas al

---

<sup>1</sup> Félix Moreno Pichardo. Coordinador Aéreo. CONAFOR, Estado de México. Km. 43.5, Carretera México Toluca, Campamento Forestal. Ocoyoacac, Estado de México. Tel. 01 728 28 23 456.



ecosistema por motivos de la construcción de los SCALL se recurrió a la impermeabilización de laderas con geomembrana de PVC (Policloruro de Vinilo).

El proceso de impermeabilización con este material, requiere sólo de nivelación y compactación del área; la primera, favorece el escurrimiento homogéneo y la segunda, incrementa la densidad aparente del suelo ofreciendo mayor soporte y estabilidad (Juan, 2006; Firestone, 2008; Anaya, 2011).

La altura del muro del área de captación se estimó a partir del volumen total de agua para cada sección de Aec; a partir de la pendiente media del terreno definida en 15% (15 metros de altura por cada 100 metros de longitud) y la longitud del área de captación, 45 m en todos los casos, se obtuvo la altura y posteriormente la superficie de la sección (altura por longitud); finalmente, se estimó la altura del muro al dividir el volumen potencialmente almacenable en cada Aec (producto de la superficie del Aec y la lámina de intensidad de lluvia de 30 minutos) entre la superficie de la sección estimada.

#### 5) Cálculo del volumen del sedimentador

Como parte del diseño del sistema de almacenamiento se propuso la construcción de un sedimentador entre el área de captación y el sistema de almacenamiento. Dos métodos fueron utilizados para calcular el volumen del sedimentador, el del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS) (2005) y el del CIDECALLI - CP (2011), a fin de realizar una comparación de los resultados y seleccionar el más adecuado.

El método CIDECALL - CP (2011) calcula el volumen del sedimentador con base en la siguiente expresión:

$$\text{Vol. sedimentador} = \frac{\text{Aec} \times \text{Id}}{3}$$

Donde:

Vol. sedimentador = volumen del sedimentador (m<sup>3</sup>).

Aec = área efectiva de captación de lluvia (m<sup>2</sup>) y se calcula de acuerdo a lo propuesto en el inciso 3.

Id = lluvia máxima registrada en 24 horas (m).

6) Cálculo del diámetro y longitud de la tubería para conducir el volumen de agua recolectada.

Se determina el gasto con la intensidad de lluvia para 30 minutos y 10 años de periodo de retorno de acuerdo a la expresión siguiente:

$$Q_c = \frac{(A_{ec} \times I_d)}{1800}$$

Donde

$Q_c$  = gasto de entrada ( $m^3 s^{-1}$ ).

$A_{ec}$  = área efectiva de captación ( $m^2$ ). Se calcula de acuerdo a la expresión den inciso 3.

$I_d$  = Intensidad de lluvia para 30 minutos y un periodo de retorno de 10 años (m).

1800 = total de segundos en 30 minutos.

Conocido el gasto, se aplicó la expresión siguiente para determinar el diámetro de la tubería:

$$D^2 = \frac{4 \times Q}{V \times \Pi}$$

Donde:

$D^2$  = diámetro de la tubería (m)

$Q_c$  = gasto en 30 minutos ( $m^3 s^{-1}$ )

$V$  = velocidad propuesta ( $ms^{-1}$ )

$\Pi$  = 3.1416

La velocidad propuesta ( $V$ ) fue de  $0.8 ms^{-1}$  (Anaya, 2011); las intensidades de lluvia para 30 minutos con 10 años de periodo de retorno fueron de 33.49 y 41.86 mm, para las estaciones 15018 Ávila Camacho y 15106 San Rafael, respectivamente.

La longitud de las tuberías se determinó a partir de una relación entre las pendientes del terreno y la altura de los depósitos. Las pendientes del terreno donde se establecerán los SCALL son en promedio del 15%; es decir, 15 metros de altura por cada 100 m de longitud, y conociendo las alturas de los depósitos de agua se estimó la longitud necesaria de la tubería para que el agua llegue al depósito.

Por último, se determinó el volumen de agua retenido en las tuberías cuando no hay flujo y se dotó al sistema de una válvula para aprovechar el agua almacenada en las tuberías por las brigadas en tierra.

#### 7) Cálculo del sistema de almacenamiento

La estimación del volumen del sistema de almacenamiento se efectuó a partir de la expresión siguiente:

$$V. S. A. = Aec \times Ll \max^{Tr}$$

Donde:

V.S.A. = volumen del sistema de almacenamiento ( $m^3$ ).

Aec = área efectiva de captación ( $m^2$ ).

Ll máx<sup>Tr</sup> = lluvia máxima en 24 horas para un periodo de retorno determinado (m).

Para el cálculo del sistema de almacenamiento se procedió de la siguiente forma: a) se determinó el área de captación como se indicó en el inciso 3 y estimó la precipitación pluvial máxima en 24 horas, que es la magnitud de agua de lluvia que ocurre sobre una superficie en particular en la cual se genera un gasto de avenida para la que virtualmente no existe riesgo de ser excedido, a partir de los datos de las estaciones 15018 Ávila Camacho y 15106 San Rafael; b) se ajustaron los datos de LL max a la distribución Gumbel Simple, recomendada para analizar lluvias máximas diarias (Campos, 1998), con un periodo de retorno de 10 años y 90% de probabilidad de no excedencia, el cual se consideró era un margen de seguridad suficiente dadas las dimensiones del sistema de almacenamiento y su ubicación lejana con respecto a las poblaciones humanas.

Se decidió soterrar parcialmente los depósitos de agua, restándoles altura con respecto al nivel del suelo reduciendo así la longitud del sistema de conducción (tuberías).

Finalmente, se propuso colocar una cisterna, paralela al depósito principal, con capacidad de 5 000 L para verter las demasías de la precipitación pluvial; asimismo, se le dotó a la cisterna de un sistema de conducción de excedencias para desalojar el agua fuera del SCALL y verterla sobre cauces naturales. Lo anterior, es una medida precautoria considerando que la precipitación

promedio anual excede en todos los casos a la Ll max empleada en el diseño del sistema de almacenamiento; cabe mencionar que con el diseño propuesto se buscó que el sistema de almacenamiento abasteciera la demanda y los eventos de precipitación promedio extremos para 10 años de periodo de retorno. La cisterna estará dotada de una válvula que permitirá la salida del agua para recargar a 250 mochilas aspersoras con capacidad de 20 L, empleadas por los combatientes a pie.

#### 8) Microlocalización de los sitios para establecer SCALL de control de incendios forestales.

En una etapa anterior al presente estudio, se a cabo un análisis de aptitud como parte de la macrolocalización de los SCALL de control de incendios forestales, considerando cinco variables: velocidad de viento, distancia a caminos, escurrimiento superficial, evaporación y densidad de incendios. Estas fueron cartografiadas y priorizadas con el apoyo de conocimiento experto, para finalmente ser integradas en un mapa de aptitud territorial por el método de decisión multicriterio (combinación lineal ponderada). Dos zonas con aptitudes para los SCALL fueron identificadas, una al norte, en el municipio de Ixtapaluca, y otra hacia el sur, cercano a la población de Tlalmanalco en el municipio del mismo nombre, en el área de estudio (León, 2012).

Como parte de la microlocalización se realizó una Evaluación Rural Rápida (ERR) con actores claves de los municipios visitados a fin de incluir el conocimiento local en la metodología (Mbilinyi *et al.*, 2005, Grenier, 1998); la propuesta del SCALL fue validada y se identificaron los sitios más apropiados para su establecimiento, tomando como base el mapa de aptitud territorial y las variables estudiadas en la etapa de macrolocalización. Además, se realizó una evaluación en campo de los sitios seleccionados incluyendo los siguientes temas: intensidad de los vientos; accesibilidad, geoforma, textura y pendiente del terreno; antecedentes de incendios forestales; visibilidad; características hidrológicas del sitio, tipo de propiedad; seguridad del predio y aceptación comunitaria. Las respuestas fueron calificadas según su grado de compatibilidad con la variable evaluada y sus resultados comparados con la siguiente escala: a) 0 – 23 puntos, sin aptitud; b) 24 – 46 puntos, mediana aptitud; c) 47 – 70, alta aptitud.

9) Criterios a considerar en el diseño de una red de SCALL para control aéreo de incendios forestales.

Los criterios considerados para el diseño de la red de SCALL se basaron en la Norma Técnica de Puntos de Agua Específicos para la extinción de incendios forestales (VAERESA, 2007) y en entrevistas al coordinador de vuelo de la CONAFOR<sup>2</sup> en el estado de México sobre las condiciones óptimas para establecer SCALL para control aéreo de incendios forestales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1) Selección de estaciones y tratamiento los datos de precipitación pluvial

Los resultados en el tratamiento de las estaciones y datos de precipitación pluvial fueron los siguientes: a) se estimó la longitud de registro de las estaciones Ávila Camacho y San Rafael en 20 y 12 años, respectivamente; con la estimación de la longitud de registro se pretende conocer el número de años que son necesarios para que la media de los datos de precipitación pluvial tengan una probabilidad del 90%. Las estaciones, contaron originalmente con 31 y 26 años de datos acumulados de precipitación pluvial, de manera que estos son estadísticamente confiables, según la estimación de la longitud, para realizar predicciones mediante funciones de distribución. b) los datos de precipitación pluvial de cada estación se ajustaron a una función de distribución normal, c) la precipitación mensual acumulada con periodo de retorno de 1.25 años y probabilidad del 80% de ocurrencia se calculó en 370.07 y 653.59 mm para las estaciones de Ávila Camacho y San Rafael. Si bien los valores se observan conservadores, estos son capaces garantizar el 80% del abastecimiento de agua demandada.

### 2) Precipitación Neta

La Precipitaciones Netas (PN) calculadas fueron de 283.07 y 500.00 mm para las estaciones de Ávila Camacho y San Rafael, respectivamente, empleando la precipitación mensual acumulada con periodo de retorno de 1.25 años y probabilidad del 80%; el coeficiente de captación fue de 0.85 y el de escurrimiento de 0.9. Por su influencia en el territorio de Ixtapaluca

---

<sup>2</sup> Félix Moreno Pichardo. Coordinador Aéreo. CONAFOR, Estado de México. Km. 43.5, Carretera México Toluca, Campamento Forestal. Ocoyoacac, Estado de México. Tel. 01 728 28 23 456.

y Chalco la PN estimada en la estación Ávila Camacho fue utilizada en ambos municipios para diseñar sus respectivos SCALL. Asimismo, entre la precipitación mensual acumulada, con 80% de probabilidad, y la PN existe una diferencia de 86.97 y 153.59 mm debido al efecto de los coeficientes de captación y de escurrimiento; el primero, descuenta a la oferta de la precipitación las pérdidas por salpicamiento, evaporación, fricción, tamaño de gota y velocidad del viento; el segundo, considera la eficiencia de captación del material, en este caso el PVC.

Juan (2006) comparó la PN calculada con el método de curva numérica del *Soil Conservation Service* (SCS) y la PN con el uso del coeficiente de captación, encontrando mejor confiabilidad para el primero en cuanto al abastecimiento de agua; sin embargo, empleó la precipitación promedio anual para ambos casos.

Rubio (2009) propuso que, para el diseño de un sistema de captación confiable se requiere calcular un periodo de retorno para 1.25 años; es decir, un escurrimiento que se presenta en 8 de cada 10 casos (80% de probabilidad); en cambio, indica que las tormentas con frecuencia de dos años tienen probabilidades de ocurrencia del 50% y su uso con fines de diseño es cuestionable e incluso riesgoso, en cuanto a la cobertura de la demanda, si se aumenta el periodo de retorno.

Juan (2011) calculó la Precipitación Neta (PN) empleando un periodo de retorno mayor de 1.053 y menor de 2 años, con probabilidad de ocurrencia de del 80% y evitó en los cálculos el uso de la precipitación promedio anual a fin de garantizar la cobertura de la demanda de agua. En cambio, en la presente investigación la PN se calcula por la integración de la lluvia mensual acumulada con periodo de retorno de 1.25 años y probabilidad del 80% así como de los coeficientes de escurrimiento y de captación, brindando mayor certidumbre al abastecimiento de la demanda.

### 3) Cálculo de la demanda de agua

La demanda de agua para el control aéreo de los incendios forestales se calculó a partir del 10% de los incendios que afectaron superficies a partir de 5 ha durante el periodo 2005 – 2010, de acuerdo con la fórmula del inciso 3 de la metodología. En el Cuadro 1 se muestra el 10 % de la superficie incendiada, agua requerida para el control de incendios, volumen evaporado y demanda total de agua para los tres municipios.

Cuadro 1. Demanda de agua para el control aéreo de incendios forestales por municipio.

Municipio	10% de la superficie incendiada (ha)	Agua requerida para el control de incendios (m <sup>3</sup> )	Volumen evaporado (m <sup>3</sup> )	Demanda total de agua (m <sup>3</sup> )
Chalco	28.8	288	29.08	317.08
Tlalmanalco	44.9	449	39.64	488.64
Ixtapaluca	60.3	603	21.37	624.37

La mayor demanda se identificó en Ixtapaluca y la menor en Chalco. Adicionalmente, a la demanda de agua se le añadió el volumen potencialmente evaporable del sistema de almacenamiento de los meses críticos de incendios (abril y mayo). En Ixtapaluca se identificaron tres sitios para establecer SCALL por lo que la demanda se dividió entre los tres sitios, obteniéndose una demanda para cada uno de 208.12 m<sup>3</sup>.

Con relación a la demanda, Woodka (2012) refiere que el Servicio Forestal de los Estados Unidos no dispone de una cantidad estimada de agua necesaria para un periodo de incendios o para un incendio individual. En contraste, el Wild Fire Research Network (Red de Investigación sobre Incendios Forestales) (2010), ofrece una relación general de esta cantidad en galones a aplicar en 1 segundo sobre 100 pies de frente de flama, de acuerdo con el tipo y edad de la vegetación, temperatura, humedad, terreno y velocidad del viento; sin embargo, indica que los datos no son precisos, ya que las investigaciones no han tenido continuidad desde hace más de 30 años.

En la presente investigación se pudo conocer la demanda de agua para el control de incendios forestales en una hectárea de vegetación en la zona de estudio a través del conocimiento experto; que permite obtener información muy aproximada basada en la experiencia de los combatientes en el control aéreo de incendios forestales así como de los eventos extremos y necesidades de agua durante los mismos. Si bien el conocimiento experto no reemplaza las investigaciones en la materia, sí representa un factor de suma importancia a considerar e integrar en las mismas.

#### 4) Cálculo del Área efectiva de captación

Las Aec se obtuvieron en metros cuadrados por municipio con base en la fórmula propuesta en el inciso 4; inicialmente, se identificó la mayor superficie en Ixtapaluca, pero después de

dividir la superficie entre los tres sitios con aptitud identificados en el municipio para ubicar SCALL, se obtuvieron Aec modulares de 700 m<sup>2</sup> (Cuadro 2).

Cuadro 2. Áreas efectivas de captación total, ajustada y modular por municipio.

<b>Municipio</b>	<b>Aec total (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Aec ajustada (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Aec modular (m<sup>2</sup>)</b>
Chalco	1056.94	1100	‡
Tlalmanalco	977.29	1000	‡
Ixtapaluca	2081.22	2100	700

‡ Se consideró una superficie única como Aec en estos casos.

Para la impermeabilización de la ladera se seleccionó la geomembrana de PVC (Policloruro de Vinilo) por su flexibilidad y capacidad de elongación (hasta 500%); así como por su facilidad para adaptarse a las formas y reacomodos del suelo. Con base en las dimensiones comerciales para un calibre de 1 mm (1.60 x 50 m, 2 x 50 m, 14 x 50 m, 15.24 x 60.96 m), se propusieron las medidas de las sábanas de PVC convenientes para las Aec calculadas, asimismo, la altura del muro de cada Aec se estableció en 0.30 m, como medida de seguridad (Cuadro 3).

Cuadro 3 .Dimensiones de sábanas de PVC y muro del Aec de cada SCALL por municipio.

<b>Municipio</b>	<b>Aec (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Sábanas de PVC (m)</b>	<b>Unidades</b>	<b>Costo aproximado (\$)</b>	<b>Altura muro (m)</b>	<b>Altura estandarizada del muro (m)</b>
Chalco	1 100	15 x 50	2	300 000	0.08	0.30
Tlalmanalco	1 000	15 x50	2	300 000	0.12	0.30
Ixtapaluca	700	10 x 50	2	200 000	0.14	0.30

Las geomembranas de PVC no reforzadas se han aplicado con éxito para retener grandes volúmenes de agua en pendientes pronunciadas y en suelos heterogéneos; además, después de evaluaciones visuales y pruebas térmicas para calificar las características físicas del material transcurrido 24 años de uso, los resultados son satisfactorios desde el punto de vista ingenieril; empero, están condicionados a una correcta instalación de la geomembrana (Cazzuffi y Venesia, 1990; Waterproofing, 2010; Anaya, 2011). Se espera por lo tanto que la geomembrana usada como área de captación alcance una vida útil mayor de 20 años. En contraste, Wu *et al.*, (2008) destacan que las principales fallas en las geomembranas en proyectos hidrológicos se deben a defectos de fábrica y a la selección de geomembranas no texturizadas cuando se colocan en pendientes húmedas y se requiere fricción para fijarla en el suelo.



### 5) Cálculo del volumen del sedimentador

Mediante los criterios de diseño y fórmulas propuestas por el CEPIS, se determinaron las dimensiones de los sedimentadores rectangulares a establecer en cada unidad de SCALL; paralelamente, se obtuvieron las dimensiones del sedimentador con la fórmula propuesta por el CIDECALLI - CP (Cuadro 4). La comparación de volúmenes obtenidos por una y otra fórmula, identificó que las estimaciones del CEPIS fueron entre 4 y 6 m<sup>3</sup> menores.

Cuadro 4. Diseño y dimensiones de los sedimentadores por SCALL y por municipio.

Variables	Unidades	Municipio		
		Ixtapaluca	Chalco	Tlalmanalco
Caudal de diseño	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	0.017	0.027	0.023
Velocidad de sedimentación	m s <sup>-1</sup>	0.0016	0.0016	0.0016
Área superficial de la unidad	m <sup>2</sup>	10.82	17.00	14.67
Ancho del sedimentador	m	1.40	1.80	1.65
Longitud total	m	8.30	10.00	9.50
Profundidad	m	1.5	1.7	1.5
Volumen	m <sup>3</sup>	16.38	29.07	22.28
Velocidad horizontal	cms <sup>-1</sup>	0.82	0.89	0.95
Periodo de retención	minutos	15.78	17.82	15.82
Altura del agua al vertedor	m	1.65	1.87	1.65
Velocidad de paso entre los orificios	m s <sup>-1</sup>	0.05	0.05	0.05
Área total de los orificios	m <sup>2</sup>	0.35	0.54	0.47
Diámetro de los orificios	m	0.1	0.1	0.1
Área de cada orificio	m <sup>2</sup>	0.008	0.008	0.008
Número de orificios	orificios	44	70	60
Altura de la pantalla difusora	m	0.9	1.02	0.9
Número de filas de los orificios	filas	7	7	7
Número de columnas	columnas	7	10	9
Espaciamiento entre filas	m	0.13	0.15	0.13
Espaciamiento entre columnas	m	0.20	0.18	0.18
Costo aproximado sedimentador	\$			
Volumen según CIDECALLI – CP	m <sup>3</sup>	20.77	32.63	28.17

### 6) Cálculo diámetro y longitud de tubería.

Aplicando la ecuación de inciso 5 indicada en la metodología, se obtuvieron diámetros aproximados de 5.67, 9.53 y 10.61 pulgadas para los SCALL de Ixtapaluca, Chalco y

Tlalmanalco; se adoptaron, sin embargo, diámetros comerciales de 6, 10 y 12 pulgadas; asimismo, como medida de seguridad se colocarán dos tuberías de PVC con coladeras en sus extremos, facilitando, por una parte, la salida del agua del Aec hacia el sistema de almacenamiento y evitando, por la otra, la obstrucción de las tuberías con objetos extraños. Al respecto, Juan (2006) comparó la estimación del diámetro de tuberías a partir del método de Swamee y Jain (MINVU, 1996) y de la ecuación de continuidad (la cual desprecia las pérdidas de cargas por fricción, el tipo de material y longitud de conducción), encontrando que ésta última estima los diámetros al doble de los segundos y elige estos para el sistema de conducción por razones de seguridad; Saavedra y Ugarte (2001) encontraron que la ecuación de Manning, componente de la ecuación de continuidad, es exacta para tuberías de 1 m de diámetro y muy fiable para diámetros comprendidos entre 0.4 y 1 m. En contraste, Allasia (2000), menciona que las estimaciones aplicando la ecuación de continuidad, si bien son expeditas, dan valores de diámetros relativamente grandes y conducen el agua a velocidades bajas.

Las longitudes de las tuberías, considerando el soterrado de los tanques al 50 % de su altura, fueron de 11.27, 14.07 y 14.07 m, para los SCALL de Ixtapaluca, Chalco y Tlalmanalco. El soterrado permitió reducir las longitudes del sistema de conducción y del perímetro del enmallado rodeará a los SCALL.

El agua almacenada en las tuberías, resultado de la ausencia de flujo continuo, se calculó en 478.44, 956.34 y 825 L. Para fines de su aprovechamiento, las tuberías de PVC estarán dotadas de una válvula que permita la colecta del agua y uso en el control de incendios.

#### 7) Cálculo del sistema de almacenamiento

Las lluvias máximas (Ll max) estimadas con periodo de retorno de 10 años y 90% de probabilidad de no excedencia empleando la función de distribución tipo Gumbel simple, fueron de 398.13 y 479.27 mm, para las estaciones 15018 Ávila Camacho y 15106 San Rafael, respectivamente; como se esperaba, los valores de Ll max fueron superiores a los de la PN, lo que permitirá estimar un sistema de almacenamiento que satisfaga la demanda y reduzca el riesgo de excedencia del sistema hasta en un 90% de probabilidad, basado en lluvias máximas en 24 horas. Los volúmenes de los sistemas de almacenamiento fueron calculados a partir la superficie del Aec y la Ll max <sup>Tr</sup>, según se propuso en el inciso 7 de la metodología,

obteniéndose los siguientes resultados: 280, 440 y 480 m<sup>3</sup>, para Ixtapaluca, Chalco y Tlalmanalco, respectivamente.

Los volúmenes encontrados son congruentes con lo establecido por VAERSA (2007) que propone una capacidad mínima útil de 200 m<sup>3</sup> para los depósitos circulares y establece como medidas óptimas diámetros de 10 m y profundidades de 3 m. En cambio, Villalba (2008) sugiere que los depósitos destinados al control de un incendio forestal mediano deben de tener una capacidad de 40 m<sup>3</sup>, aunque reconoce que el agua almacenada podría no ser suficiente y las dimensiones pueden causar dificultades durante la recarga de los helicópteros.

Los excedentes generados por las precipitaciones pluviales extremas y las acumuladas en el año serán almacenados en una cisterna de 5000 L de capacidad. El agua pluvial será conducida del sistema de almacenamiento a la cisterna por tubo de demasías; la cisterna contará además con su tubo de demasías para verter los excedentes fuera del SCALL en caso de ser necesario. Con esta adaptación se pretende, evitar la excedencia de agua en el sistema de almacenamiento y contar con la capacidad para recargar 250 mochilas aspersoras de 20 L para los brigadistas combatientes.

Considerando que la mayoría de los sitios identificados para ubicar SCALL se encuentran en el Parque Nacional Izta-Popo y que ésta es una figura de ANP que restringe las obras con alto impacto ambiental, se eligieron a los tanques metálicos circulares como sistema de almacenamiento porque evitan excavaciones profundas en los sitios seleccionados y por sus antecedentes como sistema de almacenamiento de agua en el control de incendios forestales (Sabater, 2010; STK, 2011). Además, estos tanques son desarmables y pueden ser movidos con facilidad de un sitio a otro de ser necesario. Los depósitos serán soterrados al 50% de su altura.

Las capacidades de los tanques seleccionados y profundidad de soterrado, se indican en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Dimensiones de los tanques metálicos circulares propuestos.

<b>Municipio</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Diámetro (m)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Costo aproximado (\$)</b>	<b>Profundidad de soterrado (m)</b>
Chalco	501	12.32	3.38	1 397 000	1.69
Tlalmanalco	501	12.32	4.22	2 100 000	2.11
Ixtapaluca	295	10.56	4.22	2 260 000	2.11

La profundidad operativa mínima de los depósitos se definió en 3 m, de acuerdo con lo sugerido por el coordinador de vuelo de la CONAFOR y considerando las maniobras de un helicóptero para cargar agua (acercamiento, alejamiento y carga de agua) (Villalba, 2008). Dado que los depósitos permanecerán abiertos durante los meses críticos de incendios forestales y previendo la llegada de aves, se colocará una rampa de seguridad al interior del mismo para facilitar su salida evitando que se ahoguen. Cabe mencionar que los sistemas permanecerán cerrados, a excepción de los meses críticos de incendios, con una tapa de geotextil para evitar la evaporación del agua.

8) Microlocalización de los sitios para establecer SCALL de control de incendios forestales.

La ERR aplicada en el municipio de Ixtapaluca identificó tres parajes como los mejores para instalar los SCALL: Huilapan, Tezontlalpan y Llano grande; estos mismos se evaluaron en campo mediante un formato (anexo 1), obteniéndose los siguientes puntajes: 54, 58 y 62 puntos, respectivamente (según se describió en el inciso 8 de la metodología), por lo que se les calificó con alta aptitud. No obstante, se identificaron elementos restrictivos en cada sitio (Cuadro 6) que fueron tomados en cuenta para definir el diseño del SCALL.

Cuadro 6. Parajes y restricciones para la instalación de SCALL por municipio.

Municipio	Paraje	Restricciones
Ixtapaluca	Huilapan	El sitio se ubica en el Parque Nacional Izta-Popo, por lo que las actividades constructivas deben ser de bajo impacto. Vegetación circundante en regeneración, después de haberse detenido la tala clandestina. Vandalismo frecuente en el área.
	Tezontlalpan	Vandalismo potencial. Afluencia importante de gente durante el mes de diciembre por encontrarse al paso del camino de peregrinaje a la ciudad de México. El terreno es ejidal, por lo que la propuesta deberá someterse a la asamblea de ejidatarios.
	Llano Grande	Autorización del Parque Nacional Izta-Popo pues algunas de sus instalaciones ocupan el predio.
Chalco	Paso del conejo	El terreno es ejidal, por lo que la propuesta deberá someterse a la asamblea de ejidatarios. Vandalismo potencial.
Tlalmanalco	Tres cruces	El sitio se ubica en el Parque Nacional Izta-Popo, por lo que las actividades constructivas deben ser de bajo impacto. Vandalismo potencial.

En el caso del municipio de Chalco y Tlalmanalco, después de la ERR y el recorrido de campo, se identificó un sitio para cada caso: el paraje de Paso del conejo y Tres cruces, cuyos puntajes fueron de 59 y 55. Mbilinyi *et al.*, (2005), emplearon satisfactoriamente el conocimiento local para ubicar SCALL en una comunidad africana: reservorios agrícolas, canales y estructuras de almacenamiento en general; a través de talleres participativos compararon los indicadores técnicos y comunitarios empleados para identificar sitios potenciales donde colocar SCALL y encontraron gran semejanza entre ambos; al combinarlos se fortalecieron las capacidades comunitarias para la toma de decisiones.

### 9) Red de SCALL para control aéreo de incendios forestales

Para establecer la RED, todos los sitios propuestos se ubicaron a distancias de 10 km lineales, equivalentes a 4 minutos ida y vuelta del helicóptero, a las zonas de mayor ocurrencia de incendios y separados unos de otros por distancias máximas de 5 km; estos parámetros fueron determinados por el coordinador de vuelo de la CONAFOR como funcionales para la recarga eficiente del helicóptero, el control de los incendios forestales y el desplazamiento de las brigadas a cada SCALL a fin de atender las operaciones en tierra de la aeronave durante la recarga (Fig.2).

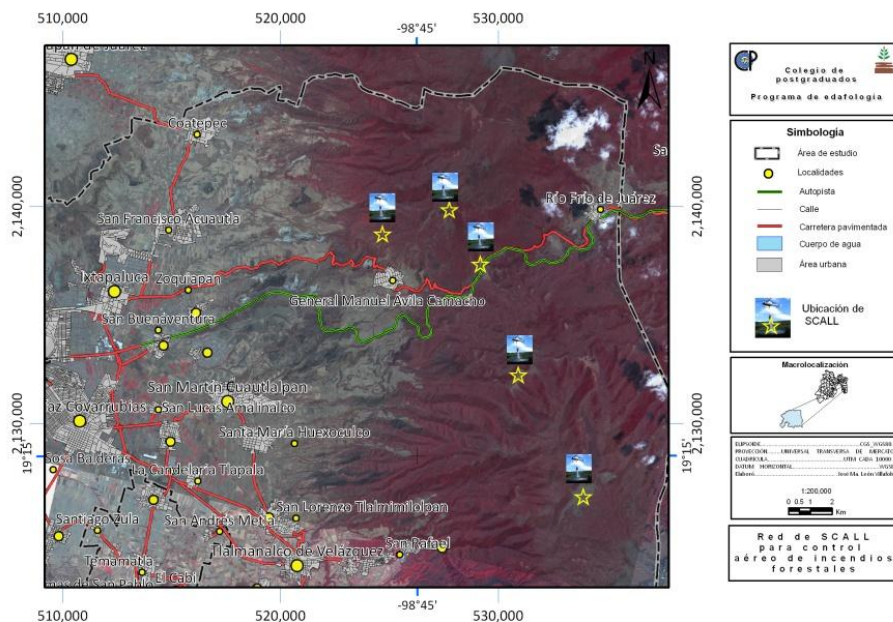


Figura 2. Red de SCALL para control de incendios forestales en la zona de estudio.

En otras propuestas para la ubicación de los depósitos de agua sólo se considera un tiempo de 5 o 10 minutos la red de compartimentación (obstáculos destinados a evitar la propagación del suelo) y la red de accesos; además, los depósitos son asignados a una determinada superficie forestal, comprendida entre 500 y 2000 ha, considerada como un parámetro óptimo para garantizar la eficiencia en el control aéreo (Villalba, 2008); de acuerdo con VAERSA (2007) la separación conveniente entre uno y otro depósito debe de ser de 2.5 km; sin embargo, para el caso mexicano y en particular la zona de estudio, estas distancias son demasiado cercanas.

Asimismo, alrededor del SCALL se estableció un radio de 20 m sin obstáculos de vegetación u orográficos, a fin de que no se interfiera con el rotor o cualquier otra parte del helicóptero (VAERSA, 2007). Por motivos de seguridad, se propuso colocar un enmallado perimetral de alambre galvanizado y corona de alambre de púas en todo el perímetro del SCALL, cuya altura será igual a la de los depósitos; se colocará, además, la señalización que indique el propósito del sitio así como su coordenada. La malla y el depósito se pintarán de color amarillo para facilitar su ubicación desde el aire. Finalmente se generó un mapa que presenta la Red de SCALL para control aéreo de incendios forestales en la zona de estudio.

## **CONCLUSIONES**

En la presente investigación se generó una red de SCALL, integrada por cuatro sitios que fueron definidos en función de la demanda de agua, de la evaluación rural rápida y de los recorridos de campo, para apoyar el control aéreo de incendios forestales en tres municipios del estado de México, para ello se generó una metodología con base en la propuesta del CIDECALLI – CP, se emplearon probabilidades de lluvia y lluvias máximas, SIG, conocimiento local, conocimiento experto y evaluaciones rurales participativas.

En la estimación de la Precipitación Neta se ajustaron los datos de lluvia a funciones de distribución con probabilidades del 80% a fin de satisfacer la demanda de agua; para el diseño del sistema de almacenamiento se calculó la Lluvia Máxima en 24 horas con periodo de retorno de 10 años y 90% de probabilidad de no excedencia a partir de la distribución Gumbel Simple, estimándose un volumen del sistema de almacenamiento que cubriera la demanda de agua y garantizara la no excedencia del sistema hasta con un 90% de probabilidad. Para almacenar el agua de lluvia se seleccionaron los tanques metálicos circulares, por sus antecedentes como

sistema de almacenamiento de agua en el control de incendios forestales y se propuso soterrarlos al 50% de su profundidad a fin de reducir la longitud del sistema de conducción. Paralelamente, se propuso añadir al sistema de almacenamiento una cisterna de 5000 L para captar las excedencias de agua en caso de una precipitación extrema.

Por otro lado, los volúmenes de la demanda de agua, basada en el 10% de los incendios que afectaron superficies a partir de 5 ha durante el periodo 2005 – 2010, fueron mayores que los propuestos VAERSA en el caso español como volúmenes mínimos para depósitos destinados al control de incendios forestales. Para contar con un área de captación, se decidió impermeabilizar las laderas con geomembrana de PVC, se eligió este material por su durabilidad, fácil adaptación a cualquier tipo de suelo y movimientos mínimos de tierra requeridos para su instalación. En los SCALL desarrollados por el CIDECALLI –CP, la impermeabilización con geomembranas de PVC ha dado resultados satisfactorios con una relación costo – beneficio positiva; la durabilidad de la geomembrana supera los 20 años, aumenta el coeficiente de escurrimiento acercándolo a 0.9, reduce infiltraciones y la evaporación en los sistemas de almacenamiento. Dado los beneficios, el uso de la geomembrana es frecuente en los SCALL permitiendo abaratar sus costos y su financiamiento por diversas instancias gubernamentales.

La combinación del conocimiento local, la aptitud territorial y la evaluación de campo para la microlocalización de los SCALL es un método prometedor que arroja buenos resultados; los parajes visitados para validación fueron calificados con la categoría de alta aptitud; sin embargo, se identificaron algunas restricciones que fueron solucionadas en el diseño, por ejemplo el enmallado perimetral. Los sitios propuestos conservaron una distancia, respecto de la fuente de los incendios, de 10 km lineales y una separación de 5 km entre uno y otro. Se añadieron también al diseño otros parámetros de funcionalidad: señalización (letrero y pintado en color amarillo de la malla y tanque), coordenada de localización del sitio y rampa de seguridad en el sistema de almacenamiento para facilitar la salida de aves cuando el depósito permanezca abierto.

Se puede concluir que el control de incendios forestales a través de los SCALL representa un precedente como propuesta innovadora incorporando esta tecnología en áreas forestales para abastecer de agua a las aeronaves en el control de incendios forestales en áreas poco accesibles de una manera oportuna y eficiente; asimismo, se establece el concepto de red de SCALL para control aéreo de incendios forestales, ausente en el estado de México y el país.

## REFERENCIAS

- Allasia, D. G. 2000. Estimación del diámetro económico de la tubería de un sistema de bombeo. Brasil, universidad nacional del nordeste [en línea]. Disponible en : [http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2000/7\\_tecnologicas/t\\_pdf/t\\_020.pdf](http://www.unne.edu.ar/Web/cyt/cyt/2000/7_tecnologicas/t_pdf/t_020.pdf) (Consultado el 22 de mayo de 2012).
- Anaya G., M. 2011. Captación del agua de lluvia: solución caída del cielo. Ed. Colegio de Postgraduados – Mundi Prensa. México, D.F. 132 p.
- Calabri, G. 1983. La biosfera y la contaminación química. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales [en línea]. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/q2570s/q2570s00.htm> (Consultado el 20 de enero de 2012).
- Campos A., D. F. 1998. Procesos del ciclo hidrológico. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 556 p.
- Cazzuffi, D. A. and Venesia, S. 1990. The use of thermal analysis for the evaluation of the durability of a 24-year-old PVC geomembrane. In: American Society for Testing Materials. Ed. Geosynthetics: microstructure and performance. Philadelphia, E.U. 17 -25 p.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (CEPIS). 2005. Lima, Perú. 34 p. [en línea]. Disponible en [http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/035\\_dise%C3%B1o%20de%20desarenadores%20y%20sedimentadores/Dise%C3%B1o%20de%20desarenadores%20y%20sedimentadores.pdf](http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsacg/guialcalde/2sas/d23/035_dise%C3%B1o%20de%20desarenadores%20y%20sedimentadores/Dise%C3%B1o%20de%20desarenadores%20y%20sedimentadores.pdf) (Consultado el 18 de junio de 2012).
- De Winnaar, G., G. P. W. Jewitt and M.Horan. 2007. A GIS-based approach for identifying potential runoff harvesting sites in the Thukela River basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* 32 (3):1058-1067.
- Durga Rao, K. H. V. and M. K. Bhaumik. 2003. Spatial expert support system in selecting suitable sites for water harvesting structures "A case study of song watershed, Uttaranchal, India". *Geocarto International.* 18 (4):43-50.
- Firestone. 2012. Firestone Geomembrane [en línea]. Disponible en <http://www.firestonesp.com/geomembrane.aspx> (Consultado el 4 de mayo de 2012).



- Grenier, L.1998. Working with indigenous knowledge. International Development Research Centre. [en línea]. Disponible en <http://www.idrc.ca/EN/Resources/Publications/Pages/IDRCBookDetails.aspx?PublicationID=293> (Consultado el 18 de mayo de 2012).
- Grupo Sabater. 2010. Depósitos de agua contra incendios forestales en España [en línea]. Disponible en [http://www.sabatergrup.com/gestion\\_de\\_agua\\_depositos\\_embalses\\_desmineralizacion.asp](http://www.sabatergrup.com/gestion_de_agua_depositos_embalses_desmineralizacion.asp) (Consultado el 19 de enero de 2012).
- Juan, M., J. 2011. Estrategias para el abastecimiento de agua a comunidades marginadas y urbanas. Colegio de Postgraduados - Departamento de hidrociencias. Texcoco, estado de México.
- Juan, M., J. 2006. Captación y purificación de agua de lluvia para consumo humano. Colegio de Postgraduados - Departamento de Hidrociencias. Texcoco, estado de México.
- Mbilinyi, B. P., Tumbo, S. D., Mahoo, H. F., Senkondo, E. M. and Hatibu, N. 2005. Indigenous knowledge as decision support tool in rainwater harvesting. *Physics and chemistry of the earth, parts A/B/C.* (30):792-798.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo.1996. Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Santiago, Chile [en línea]. Disponible en [http://www.minvu.cl/opensite\\_det\\_20070317115825.aspx](http://www.minvu.cl/opensite_det_20070317115825.aspx) (Consultado el 21 de junio de 2012).
- Promotora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). 2011. Probosque en alerta durante la temporada de estiaje (6) [en línea]. [http://www.forestalxxi.com/index.php?option=comcontent&view=article&id=243:probosque-en-alerta-durante-la-temporada-de-estiaje&catid=76:probo\\_osque&Itemid=70](http://www.forestalxxi.com/index.php?option=comcontent&view=article&id=243:probosque-en-alerta-durante-la-temporada-de-estiaje&catid=76:probo_osque&Itemid=70) (20 de enero de 2012).
- Promotora de Bosques del Estado de México (PROBOSQUE). 2007. Combatirán incendios por aire. Toluca, Estado de México [en línea]. Disponible en <http://portal2.edomex.gob.mx/edomex/inicio/index.htm> (Consultado el 20 de enero de 2012).
- Renolit Waterproofing. 2010. The Barlovento reservoir. Barcelona, España [en línea]. Disponible en [http://www.alkorproof.com/sp/about\\_us.php](http://www.alkorproof.com/sp/about_us.php) (Consultado el 2 de julio de 2012).
- Rodríguez T., D. A., M. Rodríguez. A., y F. Sanchez. F. 2000. Educación e incendios forestales. Editorial Mundi-Prensa. México, D.F. 201 p.
- Rubio, G. E. 2009. Manejo de escurrimientos superficiales. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México.

- Saavedra, I., M.A. and Ugarte, G., N.R. 2001. Abastecimiento de agua potable. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamaba, Bolivia. [en línea]. Disponible en <http://www.umss.edu.bo/librotextost1ing.php> (Consultado el 12 de abril de 2012).
- Storage Tank Solutions. 2011. Tanques de almacenamiento de gran volumen. Ohio, E.U [en línea]. Disponible en <http://www.storagetanksolutions.com> (Consultado el 10 de febrero de 2012).
- VAERSA. 2007. Norma técnica de puntos de agua específicos para la extinción de incendios forestales. Consejería de medio ambiente, Urbanismo y Habitat. Polinyá del xúquer, Valencia, España [en línea]. Disponible en <http://cth.gva.es/web/indice.aspx?nodo=61115&idioma=V> (Consultado el 25 de mayo de 2012).
- Villalba, M., M.A. 2008. Infraestructuras de defensa contra incendios forestales. Ed. Aifema. El chaparral, Granada, España. 272 p.
- Wild Fire Research Network. 2010. Congressional panel: initial attack on the station fire. Pasadena, California, E.U. [en línea]. Disponible en [http://www.wildfireresearch.org/WRN\\_Station\\_Fire\\_Congressional\\_Testimony.pdf](http://www.wildfireresearch.org/WRN_Station_Fire_Congressional_Testimony.pdf) (Consultado el 29 de junio de 2012).
- Woodka, C. 2012. Forest service pays water costs in fighting fires. Chieftain. Colorado [en línea]. Disponible en [http://www.chieftain.com/news/local/forest-service-pays-water-costs-in-fighting-fires/article\\_bd195726-c00d-11e1-935e-0019bb2963f4.html](http://www.chieftain.com/news/local/forest-service-pays-water-costs-in-fighting-fires/article_bd195726-c00d-11e1-935e-0019bb2963f4.html) (Consultado el 2 de julio de 2012).
- Wu, W., Wang, X. T. and Aschauer, F. 2008. Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir. *Geotextiles and geomembranes* (26):363-370.

## **CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES**

La presente investigación evaluó, en su primera etapa, la capacidad territorial en tres municipios de la zona oriente del estado de México: Chalco, Tlalmanalco e Ixtapaluca, para establecer Sistemas de Captación del Agua de Lluvia (SCALL) destinados al control aéreo de incendios forestales, conjuntando variables que afectaban directamente el carguío de agua del helicóptero y las hídrica, a través de un método de evaluación multicriterio en SIG.

La integración de las diferentes variables mediante el método de combinación lineal ponderada permitió identificar en poco más del 28% del área de estudio buenas aptitudes para albergar SCALL, concentrándose en dos zonas: al norte, en el municipio de Ixtapaluca, y al sur, en el municipio de Tlalmanalco. Las variables analizadas respondieron, en su mayoría, con una relación positiva; sólo la velocidad de viento y la densidad de incendios no fueron congruentes con los valores de aptitud mostrados por el conjunto de variables. En el caso de la velocidad de viento, esta relación negativa pudo deberse a la ausencia de registros suficientes y limitada representatividad de las EMAS.

La aptitud identificada fue la base para definir la ubicación de una red de SCALL, en la segunda parte de la investigación, para apoyar el control aéreo de incendios forestales en los tres municipios del estado de México antes mencionados; para ello, se generó una metodología con base en la propuesta del Centro Internacional de Demostración y Capacitación en Aprovechamiento del Agua de Lluvia (CIDECALLI) – Colegio de Postgraduados (CP), se emplearon probabilidades de lluvia y lluvias máximas, SIG, conocimiento local, conocimiento experto y evaluaciones rurales participativas.

En la estimación de la Precipitación Neta se ajustaron los datos de lluvia a funciones de distribución con probabilidades del 80% a fin de satisfacer la demanda de agua; para el diseño del sistema de almacenamiento se calculó la Lluvia Máxima en 24 horas con periodo de retorno de 10 años y 90% de probabilidad de no excedencia a partir de la distribución Gumbel Simple, estimándose un volumen del sistema de almacenamiento que cubriera la demanda de agua y garantizara la no excedencia del sistema hasta con un 90% de probabilidad. Para almacenar el agua de lluvia se seleccionaron los tanques metálicos circulares, por sus antecedentes como sistema de almacenamiento de agua en el control de incendios forestales y se propuso soterrarlos al 50% de su profundidad a fin de reducir la longitud del sistema de conducción. Paralelamente,

se propuso añadir al sistema de almacenamiento una cisterna de 5000 L para captar las excedencias de agua en caso de una precipitación extrema.

Por otro lado, los volúmenes de la demanda de agua, basada en el 10% de los incendios que afectaron en el área de estudio superficies a partir de 5 ha durante el periodo 2005 – 2010, fueron mayores que los propuestos como volúmenes mínimos por la Norma Técnica de Puntos de Agua Específicos en España para los depósitos destinados al control de incendios forestales. A fin de contar con un área de captación, se decidió impermeabilizar las laderas con geomembrana de PVC, se eligió este material por su durabilidad, fácil adaptación a cualquier tipo de suelo y movimientos mínimos de tierra requeridos para su instalación. En los SCALL desarrollados por el CIDECALLI –CP, la impermeabilización con geomembranas de PVC ha dado resultados satisfactorios con una relación costo – beneficio positiva; la durabilidad de la geomembrana supera los 20 años, aumenta el coeficiente de escurrimiento acercándolo a 0.9, reduce infiltraciones y la evaporación en los sistemas de almacenamiento. Dado los beneficios, el uso de la geomembrana es frecuente en los SCALL permitiendo abaratar sus costos y su financiamiento por diversas instancias gubernamentales.

La combinación del conocimiento local, la aptitud territorial y la evaluación de campo para la microlocalización de los SCALL es un método prometedor que arroja buenos resultados; los parajes visitados para validación fueron calificados con la categoría de alta aptitud; sin embargo, se identificaron algunas restricciones que fueron solucionadas en el diseño, por ejemplo el enmallado perimetral. Los sitios propuestos conservaron una distancia, respecto de la fuente de los incendios, de 10 km lineales y una separación de 5 km entre uno y otro. Se añadieron también al diseño otros parámetros de funcionalidad: señalización (letrero y pintado en color amarillo de la malla y tanque), coordenada de localización del sitio y rampa de seguridad en el sistema de almacenamiento para facilitar la salida de aves cuando el depósito permanezca abierto.

Se puede concluir que la aptitud identificada provee un marco útil para ubicar satisfactoriamente SCALL para el control de incendios forestales. Además, la presente propuesta es un precedente tecnológico e innovador en áreas forestales para abastecer de agua a las aeronaves en el control de incendios forestales en áreas poco accesibles de una manera oportuna y eficiente; asimismo, se establece el concepto de red de SCALL para control aéreo de incendios forestales, ausente en el estado de México y el país.

## **CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES**

1. En futuras investigaciones y para fines de evaluar la aptitud territorial para ubicar SCALL destinados al control de incendios forestales se pueden considerar en la variable de incendios sólo aquellos con superficies impactadas mayores a 5 ha o los menos accesibles, que son los que generalmente requieren de la participación de las aeronaves.

2. Considerando que la tasa de escurrimiento superficial, en el contexto de los SCALL, depende cada vez menos de las condiciones naturales (suelo y vegetación) gracias a los recursos tecnológicos de los que hoy día se disponen (impermeabilización de laderas), el cálculo de la variable escurrimiento superficial puede ser sustituida por un análisis menos complejo como el de las precipitaciones pluviales.

3. Realizar talleres participativos de carácter colectivo con autoridades, expertos y productores locales con experiencia para definir variables y parámetros operativos más universales que deban regir la construcción de una red de SCALL para control de incendios forestales.

4. Iniciar y desarrollar la línea de investigación sobre demanda de agua para el control aéreo de incendios forestales considerando mayores variables y circunstancias.

5. Conviene integrar elementos de decisión económicos y sociales a la definición del diseño del SCALL a fin de definir el más costeable, de menor impacto ambiental y paisajístico.

6. Es importante definir un área de experimentación de SCALL de control de incendios forestales para evaluar las estimaciones y diseños propuestos en cada uno de sus componentes.

7. Es fundamental integrar la propuesta de la red de SCALL al marco de la política forestal y a los planes estatales sobre prevención y control de los incendios forestales, de manera que existan incentivos económicos para su construcción.

## **CAPÍTULO 7. ANEXOS**





---

**SEGUNDA ETAPA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES CON SCALL**

**EVALUACIÓN RURAL RÁPIDA**

- a) Explicación de la propuesta y presentación del plano de aptitud.
- b) Aplicación de la ERP
1. ¿Cuál ha sido el incendio más importante en el área y qué problemas tuvieron para combatirlo?
  2. ¿Con qué frecuencia se da el control aéreo por incendios forestales en la zona?
  3. ¿Dónde?
  4. ¿Dónde se encuentran sitios con vientos tranquilos durante la temporada de incendios? ¿en qué otros periodos del año?
  5. ¿En los sitios indicados anteriormente la vegetación es menor a 3 o 4 m de altura?
  6. ¿Estos sitios están ausentes de elevaciones que provoquen corrientes de aire (sotavento)? ¿Por qué?
  7. ¿En estos sitios hay presencia de caminos de acceso? ¿Están cerca? ¿Cuál es su estado?
  8. ¿Dónde se encuentran los sitios con mayor precipitación? ¿Por qué? Con relación a estos sitios cómo calificaría los anteriores en términos de la lluvia? ligera, moderada o intensa.
  9. ¿Dónde se encuentran bordos o jagüeyes cercanos al sitio?
  10. ¿Cómo es el suelo? Arenoso, polvoso o pesado.
  11. Tipo de propiedad: ejidal, comunal o privada. ¿Cree usted que se aceptaría construir un SCALL?
  12. ¿Cómo se está usando el sitio?.
  13. ¿Qué estatus en materia de protección tiene la zona (ANP)?¿cuáles son las restricciones para ejecutar obras que impliquen movimiento de tierras?
  14. ¿Seguridad en el sitio y afluencia de personas al predio?
- c) Definir días de recorrido para los sitios seleccionados.



---

## SEGUNDA ETAPA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN CONTROL DE INCENDIOS FORESTALES CON SCALL

### CUESTIONARIO AL COORDINADOR ÁREO DE LA CONAFOR

¿Cuánta agua se requiere para apoyar en el control aéreo de una hectárea de vegetación incendiada? O ¿cómo determinaría el agua que se requiere para establecer un SCALL en la zona?

¿Cuántas pipas se han necesitado para abastecer el helicóptero en el peor incendio del que tenga memoria?

¿Hasta cuántos viajes puede hacer un helicóptero en apoyo al control de un incendio por día?

¿Qué distancia es la adecuada entre el SCALL y la zona del incendio?

¿La distancia de separación entre un SCALL y el otro puede ser de 2.5 km (6 minutos) o se puede espaciar más?

De haber obstáculos en la zona de carga del helicóptero al SCALL, ¿qué altura máxima deben de tener y qué radio en metros se debe de considerar como tal?

¿Qué diámetro sugiere para la zona de aproximación o de salida del helicóptero del SCALL, y qué altura máxima sugiere para los obstáculos?

¿Qué dirección del viento se prefiere para la salida del helicóptero?

¿Qué tipo de señalización se prefiere para que el SCALL pueda ser identificado desde el aire?

¿Hay algún tipo de color o colores del que deba estar pintado el SCALL?

¿Quiere añadir algo más que debiera considerarse para su construcción?



Planicie meseta depresión ladera Otra \_\_\_\_\_

g) Sitio sin vegetación u obstáculos mayores a 3 o 4 m de altura.

h) Pendiente

0 – 2 %

0 – 10 %

> 10 %

i) Erosión

Sin erosión

Con evidencias de erosión

Con erosión fuerte

j) Textura del suelo

Arenosa franca arcillosa otra \_\_\_\_\_

Observaciones \_\_\_\_\_

k) Pedregosidad

Sin pedregosidad

Poca pedregosidad

Fuerte pedregosidad

l) Vegetación y uso de suelo \_\_\_\_\_

m) Cercanía de ríos o arroyos

0 – 500 m

500 – 1000 m

> 1 km

### Sección conocimiento local experto

¿Son comunes los incendios en los alrededores? \_\_\_\_\_

¿Cuándo ocurrió el incendio más intenso (mes)? ¿Qué superficie afectó?

¿Han ocurrido aterrizajes del helicóptero en la zona o empleado el sitio para establecer los tanques armables para almacenar agua?

¿Cómo se comportan los vientos en la zona? Suaves moderados o intensos

Comentarios \_\_\_\_\_

¿Hay neblina en las mañanas durante la temporada de incendios?



- g) Longitud del bordo**
  
- h) Altura máxima**
  
- i) Forma del bordo**
  
- j) Capacidad de almacenamiento (aproximada).**
  
- k) Capacidad retenida (aproximada)**
  
- l) Presencia de fisuras**
  
- m) Roturas**
  
- n) Azolves**

**Conocimiento local**

**¿Cuándo se construyó?**

**¿Almacena suficiente agua?**

**¿Es comunitario o privado?**

**¿Llegan los animales con frecuencia?**

**¿Cómo son los vientos aquí?**