

SEQUÍA: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México



**Compiladores:
Ángel G. Bravo Lozano
Homero Salinas González
Agustín Rumayor Rodríguez**

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE-CENTRO
CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS**

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

Ing. Alberto Cárdenas Jiménez
Secretario

Ing. Francisco López Tostado
Subsecretario de Agricultura

Ing. Antonio Ruiz García
Subsecretario de Desarrollo Rural

Lic. Jeffrey Max Jones Jones
Subsecretario de Fomento a los Agronegocios

C. Ramón Corral Ávila
Comisionado Nacional de Acuicultura y Pesca

Dr. Everardo González Padilla
Coordinador General de Ganadería

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

Dr. Pedro Brajcich Gallegos
Director General

Dr. Sebastián Acosta Núñez
Coordinador de Planeación y Desarrollo

Dr. Edgar Rendón Poblete
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

Lic. Marcial A. García Morteo
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE-CENTRO

Dr. Homero Salinas González
Director Regional

Dr. Héctor Mario Quiroga Garza
Director de Investigación

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

M.S. Agustín Rumayor Rodríguez
Director de Coordinación y Vinculación en Zacatecas



Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias



SEQUÍA: Vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México

**Compiladores:
Ángel G. Bravo Lozano
Homero Salinas González
Agustín Rumayor Rodríguez**

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE-CENTRO
CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS**

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares de derechos de autor.

© Derechos Reservados.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Serapio Rendón No. 83, Colonia San Rafael

Delegación Cuauhtémoc

06470 México, D. F.

Tel. (55) 5140-1621, 5566-3638, 5546-4027

ISBN: 968-800-589-4

Centro de Investigación Regional Norte Centro.

Campo Experimental Zacatecas.

Kilómetro 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo

Apartado postal No. .

Calera, Zacatecas, 98600.

México.

Segunda edición 2006

Impreso en México

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. IMPORTANCIA DEL FENÓMENO DE LA SEQUÍA.....	5
2.1. ENFOQUES DE SU APRECIACIÓN.....	11
2.2. PRINCIPALES EFECTOS DEL DÉFICIT DE AGUA.....	13
2.3. CAUSAS COMUNES DEL DÉFICIT DE AGUA.....	15
2.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL DÉFICIT DE AGUA O SEQUÍA.....	17
2.4.1. Los deciles.....	20
2.4.2. Los percentiles.....	20
2.4.3. La normal climatológica de precipitación.....	21
2.4.4. Índice de precipitación estandarizada (SPI, <i>Standardised Precipitation Index</i>).....	22
2.4.5. Índice de severidad de sequía de Palmer.....	24
2.4.6. Otros métodos de análisis.....	26
2.5. LITERATURA CITADA.....	32
3. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA SEQUÍA.....	35
3.1. INTRODUCCIÓN.....	37
3.2. DEFINICIÓN DE SEQUÍA.....	38
3.3. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA E ÍNDICES DE ARIDEZ.....	39
3.3.1. Clasificación climática.....	39
3.3.2. Índices de aridez.....	40
3.4. METODOLOGÍA.....	42
3.4.1. Índice de aridez del Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas.....	42
3.4.2. Los climas de México.....	44
3.4.3. Índice de aridez de de Martone.....	47
3.4.4. Área de estudio.....	47
3.4.5. Generación de imágenes.....	47
3.5. RESULTADOS.....	49
3.5.1. Índice de aridez del Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas.....	49
3.5.2. Los climas de México.....	51
3.5.3. Índice de aridez de Martone.....	57
3.5.4. Comparación de los índices de aridez.....	58
3.6. CONCLUSIONES.....	60
3.7. LITERATURA CITADA.....	61
4. PROGRAMA SIG GESEZA Y EL SPI, PARA CARACTERIZAR LA SEQUÍA Y SU RELACIÓN CON SINIESTROS DE CULTIVOS DE TEMPORAL E INCENDIOS FORESTALES.....	65
4.1. IMPORTANCIA DE LA SEQUÍA.....	67
4.2. ANTECEDENTES DE LA SEQUÍA.....	69
2.1. El Índice de la Precipitación Estandarizado (SPI).....	69
4.3. METODOLOGÍA.....	71
4.3.1. Ubicación geográfica del estado de Zacatecas.....	71
4.3.2. Método de análisis.....	72
4.3.3. Aspectos teóricos del SPI.....	72
4.4. RESULTADOS.....	75
4.4.1. Análisis de la precipitación en el Estado.....	75

4.4.2. Comportamiento de la precipitación y la actividad agrícola de temporal	76
4.4.3. La caracterización de la sequía mediante el uso del SPI y su relación con los siniestros de cultivos de temporal	78
4.4.4. Análisis de la sequía mediante el uso del SPI y su relación con los incendios de pastos y árboles forestales	81
4.5. ACCIONES Y CONCLUSIONES.....	85
4.6. LITERATURA CITADA.....	86
5. APTITUD DE LOS SUELOS Y PRÁCTICAS MECÁNICAS PARA AMINORAR EL EFECTO DE LA SEQUÍA	89
5.1. INTRODUCCIÓN	91
5.2. ORIGEN DEL SUELO	92
5.3. DEGRADACIÓN DE SUELOS	95
5.4. MAPA DE APTITUD DE LOS SUELOS	99
5.5. PLANEACIÓN DE LAS ACCIONES PARA MITIGAR EL EFECTO DE LA SEQUÍA	104
5.6. COSECHA DE AGUA	104
5.5.1. Clasificación de la cosecha de agua.....	106
5.6.1.1. Captación de agua de lluvia "in situ".....	106
5.6.1.2. Sistemas de manejo de escurrimientos	107
5.6.1.2.1. Ejemplos de sistemas de manejo de escurrimientos	110
5.7. PRACTICAS VEGETATIVAS	113
5.7.1. Introducción.....	113
5.7.2. Rotación de cultivos	113
5.7.3. Cultivo en fajas.....	115
5.7.4. Reforestación	115
5.7.4.1. Plantaciones	116
5.8. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN INTEGRAL.....	118
5.9. ESTABLECIMIENTO DE PRADERAS DE ZACATE BUFFEL.....	119
5.9.1. Introducción.....	119
5.9.2. Investigación	121
5.10. PRÁCTICAS DE LABRANZA EN EL MAIZ Y FRIJOL DE TEMPORAL.....	123
5.10.1. Labranza mínima	123
5.10.2. Pileteo	124
5.10.3. Labranza de conservación	125
5.11. CONCLUSIONES.....	128
5.12. LITERATURA CITADA.....	128
6. LIMITACIONES DE AGUA: Eficiencia de uso de agua y la producción de los cultivos	133
6.1. INTRODUCCIÓN	135
6.1.1. El problema del agua en el mundo	135
6.1.2. El problema del agua en México.....	137
6.2. DEFINICIÓN DEL CONCEPTO DE USO EFICIENTE DEL AGUA.....	141
6.3. MODELO DE EFICIENCIA DE USO DE LUZ Y EFICIENCIA DE USO DE AGUA: Sistema Producto Chile.....	144
6.3.1. Soporte teórico.....	145
6.3.2 Eficiencia de Uso de Agua por los Genotipos.....	153
6.4. RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN	154

6.4.1. Concepto de evapotranspiración	154
6.4.2. Métodos para la estimación de la evapotranspiración	156
6.4.3. El coeficiente del cultivo (kc).....	159
6.5. PROGRAMAS DE RIEGO ÓPTIMO: Eficiente uso de agua en el cultivo del guayabo.....	164
6.5.1. Introducción y problema	164
6.5.2. Metodología	165
6.5.3. Resultados	166
6.5.3.1. Humedad residual y volúmenes de agua.....	168
6.5.3.2. Producción y productividad.....	169
6.5.3.3. Conclusiones	176
6.6. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA	177
6.6.1. Productividad del agua de riego: Sistema Producto Chile	179
6.6.1.1. Introducción	179
6.6.1.2. Metodología y resultados.....	180
6.6.1.3. Productividad del agua de riego.....	183
6.7. LITERATURA CITADA.....	188
7. OPERACIÓN DE LAS PRESAS EN TIEMPOS DE SEQUÍA. El uso del SPI como herramienta para caracterizar la sequía en cuencas.....	197
7.1. INTRODUCCIÓN	199
7.2. POLÍTICA DE OPERACIÓN EN FUNCIÓN DEL ESCURRIMIENTO ANTECEDENTE Y DEL ALMACENAMIENTO ACTUAL	201
7.3. EL USO DEL SPI COMO HERRAMIENTA PARA CARACTERIZAR LA SEQUÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JUCHIPILA, ZACATECAS.....	207
7.3.1. Metodología	210
7.3.2. Resultados	212
7.3.3. CONCLUSIONES	215
7.4. LITERATURA CITADA.....	215
8. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA RELACIÓN ENTRE EL USO EFICIENTE DEL AGUA Y EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS	217
8.1. INTRODUCCIÓN	219
8.2. EL USO EFICIENTE DEL AGUA Y LA PRODUCCION DE LOS CULTIVOS, BAJO INCREMENTOS DE TEMPERATURA Y DE CONCENTRACIONES DE CO ₂	221
8.3. USO EFICIENTE DEL AGUA DE LOS CULTIVOS Y CAMBIOS CLIMÁTICOS	224
8.4. RESUMEN	227
8.5. LITERATURA CITADA.....	228
9. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LA SEQUÍA EN EL ESTADO DE ZACATECAS.....	231
9.1. INTRODUCCIÓN	233
9.2. CONVERSIÓN DE CULTIVOS DE TEMPORAL EN EL ESTADO	236
9.2.1. Introducción.....	236
9.2.2. Descripción demográfica y agroecológica	237
9.2.3. Descripción productiva del Estado.....	239
9.2.4. Procedimiento	240
9.2.4.1. Requerimientos de los cultivos	242
9.2.4.2. Delimitación de zonas de alto potencial productivo.....	242
9.2.5. Superficies actuales y potenciales de especies en el estado	242

9.2.6. Análisis de rentabilidad para el cultivo del frijol en Zacatecas	245
9.2.7. Propuesta de conversión de cultivos de temporal	247
9.3. RECONVERSIÓN PRODUCTIVA. EL CASO DEL EJIDO PÀNUCO DE ZACATECAS	250
9.3.1. Introducción.....	250
9.3.2. Procedimiento	251
9.3.3. Reconversión productiva.....	252
9.3.3.1. Área agrícola.....	252
9.3.3.2. Agostadero.....	253
9.4. MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA RESISTENCIA A SEQUÍA EN MAÍZ	255
9.4.1. Introducción.....	255
9.4.2. Mejoramiento genético de maíz resistente a sequía.....	256
9.4.3. Características morfofisiológicas de las variedades	260
9.4.4. Rendimiento de grano obtenido en parcelas de validación y comerciales con algunas variedades	262
9.5. CONCLUSIONES.....	262
9.6 LITERATURA CITADA.....	263
10. CRITERIOS Y PRINCIPIOS METODOLÓGICOS A CONSIDERAR EN LA DISTRIBUCIÓN DEL DÉFICIT DE AGUA.....	269
10.1. INTRODUCCIÓN	271
10.2. DISTRIBUCIÓN DEL DÉFICIT.....	272
10.3. LA ASIGNACIÓN DEL RECURSO POR SECTOR.....	274
10.3.1 Sector doméstico-urbano	274
10.3.2 Sector agrícola	276
10.3.3 Sector industrial	276
10.3.4 Sector ganadero.....	277
10.3.5 Sector ambiental	277
10.4. AGUAS SUBTERRÁNEAS	278
10.5. EL VALOR ECONÓMICO DEL AGUA	281
10.5.1. Visión global del agua.....	282
10.6. EL MEJORAMIENTO TECNOLÓGICO DEL USO DEL AGUA EN EL RIEGO	283
10.6.1 Eficiencia en el uso del agua de riego	285
10.7. EL MERCADO DEL AGUA	286
10.8. ORGANIZACIÓN Y ESTRATEGIA PARA AFRONTAR LAS SEQUÍAS	288
10.8.1. Fases de ocurrencia de la sequía y el déficit de agua	289
10.8.2 Estrategias específicas para afrontar la sequía	293
10.9. LITERATURA CITADA.....	297

1. INTRODUCCIÓN

MC. Ángel G. Bravo Lozano
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias
abravo@inifapzac.sagarpa.gob.mx

Dr. Homero Salinas González
Director de la Región Norte Centro
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

1. INTRODUCCIÓN

Ángel G. Bravo Lozano
Homero Salinas González

La Sequía no se debe de ver como un problema, sino como una condición natural de algunas regiones del país, producto principalmente de la ausencia o irregularidad de la precipitación y el exceso de la evaporación. En forma práctica, el control de la sequía está fuera de nuestro alcance y sus efectos pueden ser modificados en forma paulatina a través del manejo del suelo, del agua y la planta, ya sea para mejorar o para empeorar esta condición.

La definición conceptual y específica de sequía es difícil de precisar, debido a un gran número de factores que intervienen en ella. Las variables que más se emplean para evaluar la sequía, solas o combinadas, son: precipitación, temperatura del aire, humedad del aire, evaporación en superficies libres, evapotranspiración, humedad del suelo, velocidad del viento y escorrentía.

A la sequía también se le puede como una situación en la que la disponibilidad de agua es insuficiente para satisfacer las necesidades de los seres vivos, donde se condiciona la posibilidad de desarrollo adecuado a las poblaciones de plantas, animales y de seres humanos.

La sequía es una propiedad normal y recurrente del clima, a la cual erróneamente se le considera algunas veces como un evento poco frecuente y aleatorio. La sequía sucede virtualmente en casi todas las zonas climáticas, aún cuando sus características varían significativamente de una región a otra. La sequía es una anomalía temporal y se distingue de la aridez, en que ésta última se restringe a regiones de baja precipitación y es una característica permanente del clima (UNL, 2003).

También puede decirse que la sequía es un fenómeno temporal que resulta de la escasez o mala distribución prolongada de la precipitación. Las anomalías de precipitación están generalmente asociadas con alteraciones en el comportamiento de los sistemas meteorológicos, que controlan el clima en los niveles de macro escala, meso escala, o local. En consecuencia, algunas sequías son de naturaleza localizada y sólo duran períodos cortos, mientras que otras están extendidas por zonas muy grandes y persisten durante largos lapsos de tiempo (INETER, 2003).

A la sequía se le considera un desastre natural, la cual es originada por una deficiencia en la precipitación sobre un periodo extendido de tiempo. Esa deficiencia ocasiona una escasez de agua para el desarrollo de actividades de grupos o sectores de la población. También, se le relaciona con la ocurrencia

temporal de las lluvias (*i.e.* estación principal en la que ocurre retraso, ya sea en el inicio de la época de lluvias u ocurrencia de las mismas en relación a las etapas principales de crecimiento de los cultivos) y la efectividad de las lluvias (*i.e.* intensidad y número de eventos de lluvias). Otros factores climáticos asociados a la severidad de una sequía son las altas temperaturas, fuertes vientos y baja humedad relativa. La sequía no debe ser vista como un simple fenómeno natural. Su impacto en la sociedad proviene de la interrelación entre el evento natural y la demanda en el suministro de agua. Por lo tanto, la sequía es una característica intrínseca de la región, por lo que se deben definir acciones para predecir su frecuencia, intensidad y escala, en el tiempo y en el espacio (UNL, 2003).

Esta Segunda Edición del libro de Sequía abarca aspectos importantes que no se tocaron en la Primera Edición, tales como la propuesta de una metodología práctica para la caracterización de la sequía en una región o en un estado. Asimismo, se habla también del cambio climático y de su relación con el uso eficiente del agua y su repercusión con los rendimientos de los cultivos.

OBJETIVOS DE LA SEGUNDA EDICIÓN

1. Proponer una definición de la sequía en base a los elementos que la integran.
2. Proponer una clasificación agroclimática de las regiones donde se presenta con mayor rigor esta condición.
3. Proponer metodologías para la caracterización de la sequía en una región.
4. Recopilar la tecnología generada en el INIFAP, que apoya a la productividad y competitividad en las regiones con sequía.
5. Relacionar el cambio climático con la disponibilidad de agua y el rendimiento de los cultivos.
6. Proponer metodologías para realizar la distribución del déficit de agua entre los factores involucrados y algunas estrategias para afrontar la sequía.
7. Difundir estas tecnologías entre colaboradores y usuarios.

LITERATURA CITADA

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). 2004. La Sequía. Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales. Managua, Nicaragua.
<http://www.ineter.gob.ni/amenazas%20naturales/sequia/Informacionsequia/sequia.htm>

Universidad de Nebraska en Lincoln (UNL). 2003. The Basics of Drought Planning: A 10-Step Process. Centro Nacional para la Mitigación de la Sequía.
<http://enso.unl.edu/ndmc/handbook/10step/process.htm>

2. IMPORTANCIA DEL FENÓMENO DE LA SEQUÍA

Dr. Israel Velasco Velasco
Especialista en Hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
ivelasco@tlaloc.imta.mx

2. IMPORTANCIA DEL FENÓMENO DE LA SEQUÍA

Israel Velasco Velasco

La sequía es un fenómeno tan complejo que resulta difícil darle un enfoque genérico que contemple todos sus aspectos y que satisfaga todas las expectativas; es más bien una particularidad del clima y del medio ambiente que a su vez tiene múltiples facetas, lo cual le confiere un carácter altamente relativo y elusivo (Dracup *et al.*, 1980). Dada la dificultad de acotar el inicio y fin del fenómeno, incluso se le llega a considerar como un *no evento*, en el sentido clásico del término.

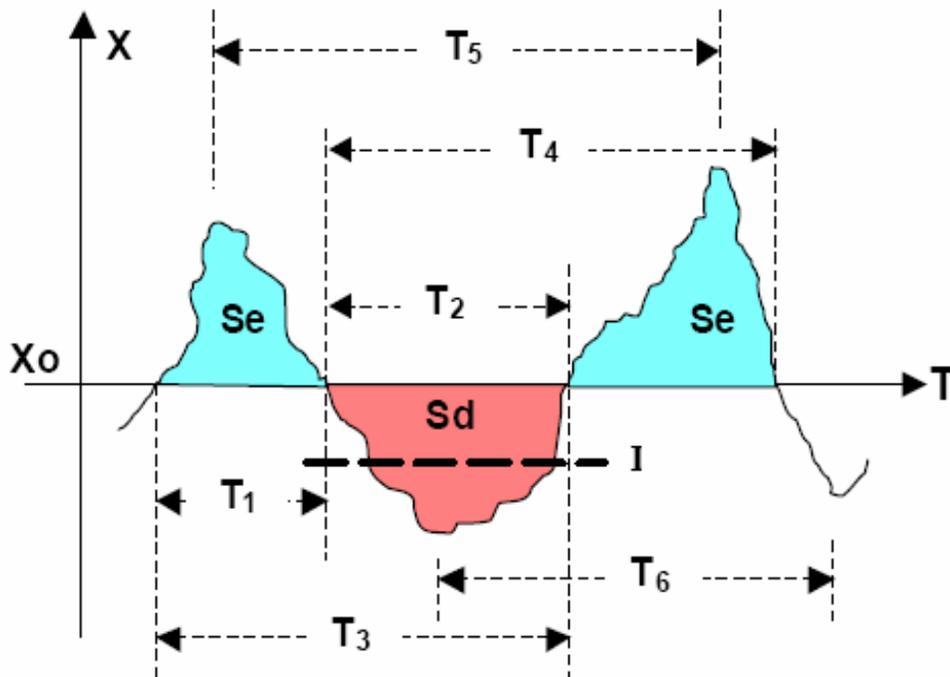


Figura 2.1. Características de interés en una serie de tiempo hidrológica, dado un nivel de truncamiento X_0 : T_1 , duración de un exceso; T_2 , duración de un déficit; T_3 , tiempo entre dos inicios de exceso consecutivos; T_4 , tiempo entre dos inicios de déficit consecutivos; T_5 , tiempo entre dos picos positivos consecutivos; T_6 , tiempo entre dos picos negativos consecutivos; I , intensidad de un déficit; S_d , severidad de un déficit; S_e , severidad de un exceso. El eje vertical representa a la variable hidrológica de interés: lluvia, escurrimiento, temperatura, etc.

En general, es difícil afirmar si ante una condición dada de ausencia de lluvias o de humedad, se trata de una sequía o de un simple retraso. Indicar con certeza cuándo empieza una sequía es de lo más incierto, pues al fenómeno se le reconoce más por los efectos que por sí mismo. El fin de la sequía es fácilmente

reconocible por la ocurrencia de lluvias en cantidad tal que satisfagan las necesidades (Palmer, 1965), por la vuelta a la “normalidad”.

De acuerdo con la Figura 2.1, la duración $T2$ de la sequía está en función, entre otros factores, del llamado *nivel de truncamiento*, Xo , referencia a partir de la cual, los valores menores representan una deficiencia y probablemente una sequía, medida en términos de la cantidad de lluvia, escurrimiento, etc. Otros dos parámetros importantes del fenómeno son la severidad (Sd) y la magnitud o intensidad (I); el primero se refiere al déficit acumulado durante el periodo de duración, y el segundo al déficit por unidad de tiempo. Además, la sequía es un fenómeno que generalmente abarca amplias extensiones espaciales, sin una dirección o trayectoria definida ni tampoco con epicentro. La relación entre I , Sd y $T2$ está dada por:

$$I = Sd / T2 \quad (4.1)$$

La relatividad de la sequía estriba en el enfoque con que se aprecie y se midan sus efectos, por lo que se pueden distinguir, en una primera aproximación, los siguientes tipos de sequía:

Meteorológica: Es la de más corta duración y está caracterizada por la ausencia de lluvias por unas cuantas semanas. Entre las consecuencias ambientales están las altas temperaturas, baja humedad ambiental y vientos frecuentemente fuertes. En general, el efecto de este tipo de sequía se manifiesta en malestar corporal que afecta mayormente a niños y ancianos, y eventualmente se producen daños a la salud por enfermedades gástricas. Es la anomalía de la lluvia a la baja en periodos que normalmente serían lluviosos.

Agrícola: Este tipo de sequía es de carácter estacional y se relaciona con la duración del desarrollo fenológico de los cultivos. Se caracteriza por insuficiente humedad en el suelo, reduciendo o nulificando el desarrollo vegetativo, y por ende, bajas en los rendimientos. El carácter estacional no es que dure una estación determinada, sino que se presenta en una estación o periodo que se esperaría fuera lluvioso. Las áreas de temporal o secano que dependen únicamente de la lluvia, son las que resienten más esta faceta de la sequía, la que puede tener severos efectos en las actividades agrícolas aún pudiendo ser relativamente moderada. La sequía en periodos tempranos afecta el periodo de siembra, mientras que en etapas avanzadas, puede disminuir drásticamente la densidad de los cultivos y su rendimiento. Por tanto, este tipo de sequía es uno de los más sensibles que afecta a los sectores más vulnerables, ya que la inoportunidad de la lluvia puede significar un año completo sin la producción agrícola temporalera, tanto de producción comercial como de autoconsumo. Esta sequía puede catalogarse como de duración media o de mediano plazo.

Hidrológica: Es un tipo de sequía de mayor plazo, que puede ser desde uno hasta de varios años; se caracteriza básicamente por una baja perceptible en los niveles de ríos, presas y acuíferos, en caudal y/o volumen. La baja en la lluvia

ocasiona la disminución de los escurrimientos, lo cual hace que los cuerpos receptores, tales como las presas, lagos y acuíferos, disminuyan su nivel y volumen. Esta sequía, por su persistencia, puede causar severos daños a la población, a los sectores sociales más desarrollados o que han hecho grandes inversiones, o a los pequeños productores dada su menor capacidad de resistir la emergencia, ya que los efectos y la recuperación son a largo plazo.

Económica: Este tipo de sequía está relacionada con los efectos de pérdida de ingreso y de productividad en aquellas actividades que tienen al agua como insumo. Está directamente relacionada con el grado de dependencia del recurso en tiempo y volumen, de las necesidades mínimas a satisfacer, de su importancia como insumo en los procesos productivos, etc.

El deterioro por subutilización del aparato productivo ocasiona disminución o pérdida de ingresos y empleos, así como carestía de los productos, todo lo cual tiene un efecto social inmediato. La economía, entendida como el flujo de recursos económicos, la producción de bienes y servicios, la creación y permanencia de empleos, y la estabilidad y desarrollo social, es probablemente donde el impacto de la sequía es más acusado y severo, ya que afecta a todos los sectores sociales y productivos. La vulnerabilidad es mayor en cuanto menor es la capacidad de resistencia de los afectados, entendida ésta como las opciones o alternativas que les permitan sostener el ingreso a través de darle otro uso al agua o de utilizarla de manera más eficiente o diferente.

Todo tipo de sequía produce efectos *ambientales* desde leves hasta muy severos, que afectan las condiciones naturales bióticas y del paisaje, y que en general se manifiestan por la sensible disminución en flora y fauna. Esta alteración por sí sola conduce a la desertización, la que al ser combinada con la actividad humana, resulta en desertificación, fenómenos prácticamente irreversibles y que pueden tener consecuencias catastróficas para la sociedad y el ambiente. La presencia de la sequía es determinante en la ocurrencia de los incendios forestales, con todo el daño ambiental que éstos representan por la contaminación y la larga recuperación a las condiciones originales.

En última instancia, los efectos de la sequía tienen una manifestación e impacto *social*, en que la gravedad del fenómeno se manifiesta desde mínimas consecuencias fácilmente superables, hasta grandes hambrunas y muerte masiva por desnutrición y sed. Pérdida de empleos y de poder adquisitivo, carestía de productos y servicios, migración del campo a las ciudades, abandono y deterioro del campo, y aumento de la pobreza, son entre otras, las consecuencias comunes de la sequía, que finalmente tiene efectos más devastadores que otros fenómenos naturales de lenta, larga y costosa recuperación.

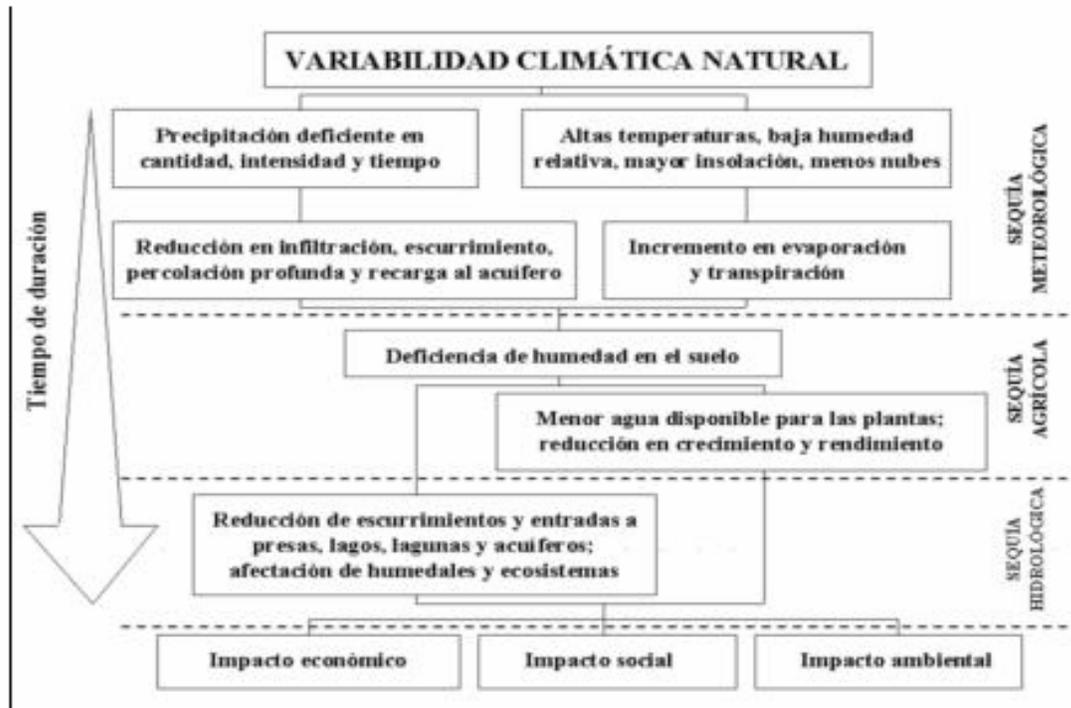


Figura 2.2. Interrelación entre los diversos tipos de sequía.

En México, la insuficiencia de agua es factor decisivo en que poblados y regiones completas sean abandonados por la población en etapa productiva, que buscan oportunidades en las grandes ciudades o en el extranjero, situaciones que frecuentemente aumentan los efectos sociales del fenómeno. Los pueblos fantasmas, donde en el mejor de los casos quedan mujeres, niños y viejos, que viven de lo escaso que produce la tierra y de lo que reciben de los hombres y mujeres que han emigrado, son una prueba patente y patética de los alcances y del impacto que produce la sequía. Ahí existe desnutrición y abandono, que afecta sobre todo a la población infantil y senil. Lamentablemente, no son raros los casos en otras naciones más desfavorecidas, donde la muerte por inanición es una situación común, que se agrava por problemas políticos, guerras, etcétera.

Dada la relatividad del fenómeno, la sequía puede existir en una condición específica o punto de vista para algunos sectores, y para otros no, cuyas condiciones de uso y demanda sean diferentes. Por ejemplo, mientras el sector agrícola puede tener severas restricciones en los volúmenes asignados en un periodo determinado, el sector industrial de menor consumo, puede no tener problemas para disponer de las cantidades necesarias. Las definiciones del fenómeno y de los conceptos asociados no son precisamente escasos (WMO, 1975). Muchos de los conceptos son generados por diversos autores en tiempos y lugares diferentes, pero la mayoría tienen validez sólo para condiciones locales o específicas, y se salen de contexto cuando se trata de aplicarlas a condiciones diferentes. Las relaciones cualitativas entre los diversos tipos de sequía se muestran en la Figura 2.2, en la cual la variable tiempo de duración es determinante (Velasco y Collado, 1998a).

Cuando una sequía se presenta en mayor o menor grado, por lo general los usos y usuarios del agua son afectados. Dependiendo de su duración y de la intensidad que adquiera, los efectos pueden ser desde leves y fácilmente recuperables hasta de severas consecuencias, con un largo y costoso periodo de recuperación (Gibbs, 1975; Velasco y Collado, 1998). Es posible que el llamado *cambio climático* esté propiciando la mayor variabilidad en la ocurrencia del fenómeno; es un tanto común que en un mismo periodo y en regiones no tan alejadas entre sí, en una se presenten lluvias torrenciales con grandes avenidas e inundaciones, mientras que en otras se tengan severos déficit por falta de lluvia. Aún cuando es todavía impreciso definir un comportamiento estricto en elementos que inciden o causan o están estrechamente relacionados con la sequía y el déficit de agua, la tendencia que se ha observado da indicios sobre la elusividad en su comportamiento (Acosta Godínez, 1988).

2.1. ENFOQUES DE SU APRECIACIÓN

Para evitar confusiones en cuanto al significado del fenómeno, conviene tomar en cuenta la siguiente reflexión: el término *sequía* describe una amplia gama de situaciones que tienen como factor común la presencia de agua en cantidades menores a lo “normal”. Debe tenerse presente que la sequía, como tal, es uno más de los múltiples componentes climáticos, que eventualmente se presenta o puede presentarse en cualquier tiempo y lugar, llevando consigo la alteración de las condiciones habituales medias. Una de las consecuencias más evidentes y potencialmente desastrosas de la sequía es el *déficit de agua*, el cual es un factor enteramente artificial, antropogénico, producto y efecto de las actividades humanas.

Frecuentemente ambos términos se emplean como sinónimos, pero un análisis más detallado conduce a establecer que son fenómenos completamente diferentes, al menos en su origen (Klemeš, 1973), aunque esa diferencia es muy sutil. La sequía siempre ha existido, y se estima que en los Estados Unidos de Norte América (USA) en cualquier tiempo hay una región severamente afectada o con algún grado apreciable de gravedad (NDMC, 1998), y más cierto aún considerando el mundo en su conjunto. En cambio, el déficit puede o no existir y hasta podría decirse que no siempre ha existido, pues sólo es función de los grupos y sociedades humanas, de su grado de desarrollo. Ello es más dramáticamente evidente en las regiones de escaso desarrollo, como las naciones africanas situadas en y al sur de la faja del Sahel, en donde la sequía acaba con plantaciones, animales y gente.

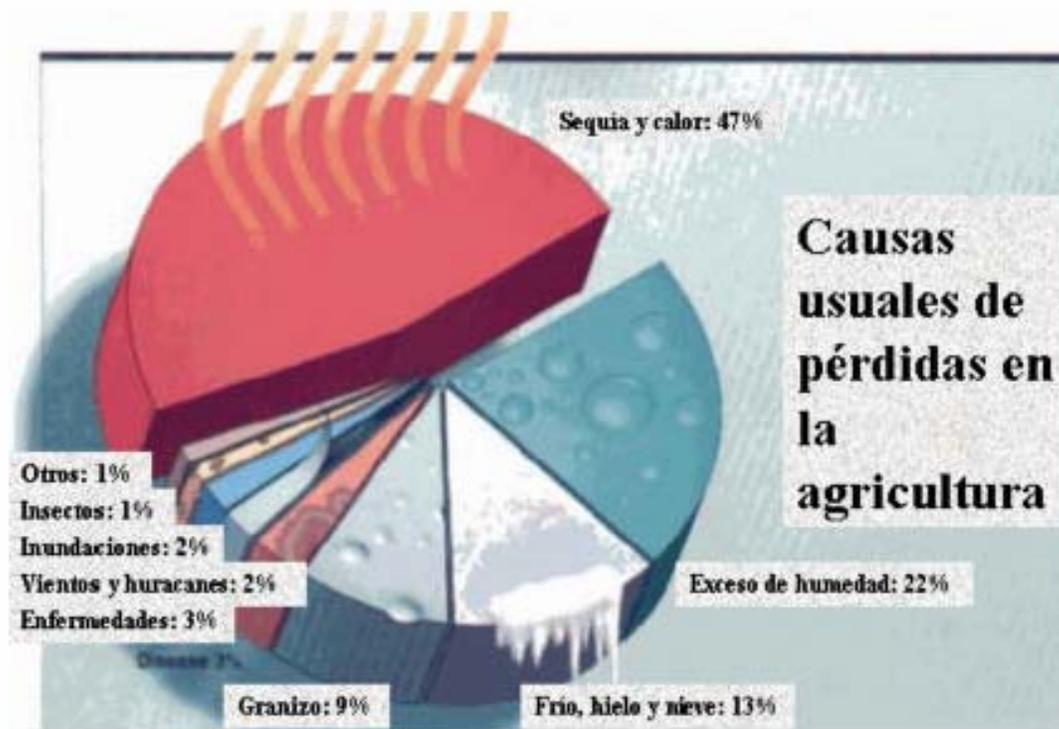


Figura 2.3. Proporción estimada de pérdidas en cultivos por efecto de diversos fenómenos naturales, sólo en los Estados Unidos de Norte América (Fuente: Managing Risk, 1997).

Como ya se ha mencionado, sequía es la insuficiencia temporal de agua, y es diferente a la *aridez*, que implica un estado permanente de falta del recurso. Si las áreas desérticas y semi-desérticas de por sí ya tienen un déficit hídrico, ello las hace más vulnerables a la ocurrencia de la sequía. Este factor hace que el país en su conjunto, y particularmente la parte norte, la más desarrollada en los sectores agrícola e industrial, sufra severos desequilibrios ante la presencia del fenómeno.

Por otro lado, la llamada “canícula” o sequía inter-estival, así como los típicos periodos “de secas o estiajes”, que usualmente ocurren en México de noviembre a mayo de forma periódica, tampoco son sequías en el sentido estricto del término, ya que su presencia es esperada en forma normal. En síntesis, la sequía existe cuando, debiendo haber agua en forma normal, no la hay o es insuficiente; es decir, cuando no llueve en periodos en que *debería* de llover, porque el comportamiento histórico así lo indica.

La sequía es un fenómeno poco espectacular, y quizá por esto no llama mucho la atención y se tiende a subestimarla. Se comporta como los enemigos silenciosos: avanza sigilosa y progresivamente y uno se da cuenta de su presencia cuando su ataque ya está en marcha. En general, la sequía no provoca daños estructurales a las obras, sino que más bien las inutiliza por inactividad. Por ello, es común la tendencia a menospreciar su presencia, esperando que sea algo de corta duración y sin mayores incidentes. No obstante, de acuerdo con

evaluaciones de los daños y pérdidas que provoca, sobre todo cuando se prolonga por mucho tiempo (más de dos años) y se combina con altas temperaturas, vistos en conjunto y en relación a la agricultura, son por lo general mayores a cualquier otro fenómeno natural, como huracanes, granizadas, heladas, plagas, etc. (NDMC, 1998). Se estima que puede alcanzar una proporción hasta del 47% del total de pérdidas en valor de las cosechas por fenómenos naturales en el país más desarrollado del mundo (Figura 2.3). De ahí que si la producción primaria de alimentos se ve afectada en estas proporciones, y si la región tiene una alta dependencia de este sector, los efectos negativos también sean severos.

En los últimos años, tanto en México como en diversas partes del mundo, pareciera que las sequías son más recurrentes y de mayores proporciones (Escalante y Reyes, 1998). Desde la perspectiva de que cada vez se está más cerca de la capacidad de los sistemas hidrológicos, e incluso en muchos casos ya se alcanzó el límite, cualquier deficiencia por leve que esta sea, tiene un amplio efecto negativo en los esquemas sociales y económicos. Así, si la demanda aumenta, aunque la recurrencia y persistencia de la sequía se mantengan o incluso disminuyan, la vulnerabilidad y el riesgo de los sistemas socioeconómicos aumentará (Wilhite, 1997).

En México, país donde la agricultura es una fuente importante de empleo y de ingreso económico, con una alta dependencia de las actividades agrícolas, tanto de riego como de temporal, la vulnerabilidad del sector agrícola implica un alto riesgo ante la presencia de las sequías, que han asolado grandes extensiones y propiciado severos desajustes a la economía regional y nacional. También influye en este hecho la gran variedad fisiográfica y climática del país, así como su situación geográfica, las cuales propician que gran parte de la superficie tenga características áridas y semiáridas; por estar situado el país en la franja desértica del hemisferio norte, la vulnerabilidad natural es alta, además de la aparentemente mayor recurrencia y persistencia del fenómeno, presumiblemente por efectos adicionales de la actividad humana a los naturales. Así, no es nada raro observar en extensas áreas del altiplano mexicano que sistemas completos de producción, antaño productivos y fuente de la estabilidad social y económica local, ahora son eriales abandonados y en decadencia.

2.2. PRINCIPALES EFECTOS DEL DÉFICIT DE AGUA

El riesgo por efectos de la sequía puede expresarse como:

$$\text{Riesgo natural} \times \text{Vulnerabilidad} = \text{Riesgo total} \quad (4.2)$$

Las componentes de la sequía pueden caracterizarse como (Wilhite, 1993):

Riesgo natural(hazard): riesgo intrínseco a la marcha climática y/o cambio climático, que ocurre sin intervención ni control humano.

Vulnerabilidad: comprende los factores socioeconómicos, así como las características ambientales inducidas que son susceptibles a las condiciones

adversas de la sequía. La vulnerabilidad está determinada por la habilidad para anticiparse, resistir y recobrase de la presencia de la sequía.

Riesgo total (risk): es el efecto potencial adverso de la sequía, como producto de la frecuencia y severidad de la misma, así como de la duración.

Los impactos de primer orden en general se limitan a los de carácter biológico, como daños en plantas y animales, mientras que los de orden superior se asocian con el daño socioeconómico, los niveles de responsabilidad y los cambios o efectos a largo plazo. Por cada uno de los grandes rubros de daño, estos se clasifican en:

Económicos:

- Pérdida de producción agrícola, pecuaria, forestal y pesquera
- Recesión en la tasa de crecimiento económico regional
- Pérdida de ingreso de productores, comerciantes, transportistas, entre otros.
- Aumento en la demanda de energía
- Decremento en industrias y actividades asociadas y/o dependientes
- Desempleo y tirantez de créditos y actividad bancaria; menor flujo de activos
- Disminución de ingresos y beneficios vía impuestos

Ambientales:

- Daño a los ecosistemas
- Erosión y pérdida de suelos
- Degradación de la calidad del agua y del aire

Sociales:

- Escasez de cantidad y calidad de alimentos
- Problemas de salud y aumento de morbilidad en sectores vulnerables
- Conflictos entre usuarios y sectores del agua
- Desigualdad en la absorción del impacto
- Baja de la calidad de vida e incremento de la pobreza
- Inestabilidad social, marginación y migración hacia áreas urbanas o al extranjero

Aunque paradójico, durante una sequía también hay sectores, empresas e individuos para quienes el fenómeno significa ganancias; es decir, no todo son pérdidas ni efectos negativos. Entre los sectores que pueden obtener beneficios por la presencia del fenómeno figuran (NDMC, 1998):

1. Los productores agrícolas de otras áreas, que sacan al mercado sus excedentes a precios significativamente mayores.
2. Los transportistas y comerciantes, que aumentan sus actividades y precios, para movilizar y vender alimentos, maquinaria, herramientas y animales.
3. Los industriales y constructores relacionados con el agua: productores de motores, bombas y accesorios, tuberías, equipo eléctrico y de control y medición, así como las compañías perforadoras, estimuladoras de lluvia y de tratamiento de agua.

4. Empresas suministradoras de energía eléctrica y combustible, por el aumento en la producción y consumo de energía para refrigeración y enfriamiento.
5. Empresas farmacéuticas y de servicios de salud, por el aumento de los padecimientos
6. La tecnología, en general, tiene un desarrollo más acelerado y vigoroso, impulsada por la necesidad de hacer un mejor aprovechamiento de la poca agua disponible; la sequía es el gran motor del desarrollo tecnológico.

Presumiblemente, las empresas aseguradoras tendrán más peso, en la medida en que se entienda y extienda la socialización de los riesgos relativos a la sequía, lo cual generaría flujos adicionales de recursos para mitigar el impacto a menor costo. Actualmente, los elevados costos del riesgo en comparación con el beneficio, cuando el fenómeno no se presenta, hacen que la actividad sea limitada, pero sus posibilidades son amplias y atractivas.

2.3. CAUSAS COMUNES DEL DÉFICIT DE AGUA

Al fenómeno de la sequía se le conoce más por sus efectos que por sí mismo. El amplio espectro del fenómeno, su persistencia y sus características tan particulares y tan elusivas, podría decirse que aún las definiciones más amplias y completas se quedan cortas en acotar lo que se pretende definir.

Si bien los efectos de una sequía generalizada se dejan sentir y afectan a todo un sistema geográfico, económico, demográfico e hidrológico, en especial, desde el punto de vista de las actividades humanas, cada sector tiene un particular enfoque del problema. Ello plantea la dificultad de llegar a un punto de acuerdo común y general en el que converjan los puntos de vista y las diversas opciones con que el fenómeno es visualizado, entendido y sobre todo afrontado en sus consecuencias.

Las zonas áridas son lugares en donde la humedad disponible normalmente es insuficiente para sostener el potencial vegetativo y de actividades económicas regionales o locales, y ello tiene su explicación en la situación geográfica, la influencia de la orografía, la altitud, la conformación geológica, etc, factores todos ellos que conforman conjuntamente el paisaje característico de estas zonas (Velasco-Molina, 1991)

Desde luego, estas áreas también están sujetas a la ocurrencia de las sequías, y de hecho son más vulnerables, lo que contribuye aún más a agravar la de por sí difícil situación hídrica. Algo curioso de estas áreas es que tanto el hombre como diversos animales y plantas tienen un gran poder de adaptación a vivir en esas condiciones frecuentemente extremas de humedad y temperatura, desarrollando mecanismos de resistencia y defensa, que les permiten prosperar y formar verdaderos ecosistemas desarrollados y establecidos. La influencia humana, por supuesto, frecuentemente significa una alteración negativa a las condiciones que en forma natural constituyen el ambiente.

También es de puntualizar que por las mismas razones, sobre todo geográficas, existen zonas más propensas a padecer la sequía, como lo son los Altiplanos Central y del Norte en México, ya sea por su lejanía respecto a las grandes masas de agua, como por su altitud y latitud, que las ubica en la franja de las altas presiones y estabilidad atmosféricas. Esto queda evidenciado por la conocida distribución teórica de la circulación atmosférica.

Desde luego que este esquema tiene variaciones, impuestas por condiciones locales o regionales, como son la orografía y el desigual calentamiento de aguas y tierras, lo cual modifica, y a veces de manera sensible el patrón general, ocasionando con ello condiciones locales que pueden diferir notablemente de lo esperado.

Tal es el caso de la Oscilación del Sur *El Niño* (ENSO, por sus siglas en inglés), que se puede presentar con cierta periodicidad y cuyos efectos de hacen sentir en amplias zonas del planeta. Para el caso de México, se supone que este fenómeno tiene un efecto positivo, sobre todo en las resacas áreas del Norte y Noroeste (“Se espera otra visita de El Niño”, 1994), en las que su presencia provee de la humedad para satisfacer las necesidades regionales de la misma; desde luego, ello significa efectos adversos en otras áreas del mundo. La Niña, que es la fase fría del ENSO, es la parte del fenómeno que en general trae efectos adversos al país, cuando la lluvia disminuye.

Sin haber aún una comprobación fehaciente, sino por la coincidencia con que ocurre, es probable que la actividad solar también tenga influencia en la alteración de los movimientos atmosféricos, y con ello en la ocurrencia de la sequía. Se ha observado que la presencia de manchas solares, que ocurren alrededor de cada 11 años, podría ser más que circunstancial: la modificación de la tasa con que llega la energía solar a la tierra incide en el cambio de temperatura y presión atmosféricas y con ello en que los patrones regulares de circulación se alteren.

Similarmente, es probable que aún en pequeña escala, aunque creciente, las actividades humanas estén influyendo en el mismo fenómeno. Las crecientes concentraciones de CO₂ en la atmósfera y su consecuente calentamiento, la alteración de la capa superior de ozono y el aumento de partículas suspendidas en el aire, producto de la quema de combustibles fósiles, una de cuyas manifestaciones es el *efecto invernadero*, pueden modificar las condiciones normales de humedad y precipitación.

Por otra parte, la deforestación y cambio de uso del suelo, propician la desertificación de amplias zonas, haciéndolas más susceptibles y vulnerables a la falta de agua (Fullen and Mitchell, 1994).

En resumen, se acepta que las causas usuales de la sequía tienen un amplio componente natural, representado por la modificación de los patrones de circulación de la atmósfera, a lo que contribuyen *El Niño* y la variación en la actividad solar, por una parte, y también a la actividad antropogénica evidenciada

por la quema de combustibles fósiles, la deforestación y alteración de los sistemas ecológicos naturales. Todo ello se manifiesta en el calentamiento de la atmósfera y sus correspondientes efectos, que en algunas regiones se manifiestan por aumento en la cantidad e intensidad de la precipitación, y en otros por la disminución de la lluvia.

2.4. MÉTODOS DE ANÁLISIS DEL DÉFICIT DE AGUA O SEQUÍA

El análisis de las sequías se puede enmarcar en cuatro aspectos principales (Goldman, 1985):

1. Determinación de la naturaleza del déficit de agua, es decir, qué tipo de sequía se requiere analizar y de qué elementos o información se disponen y requieren.
2. Identificar el tiempo y periodos de análisis, es decir, de acuerdo con el tipo de sequía, los periodos de análisis pueden ser diarios, semanales, mensuales, estacionales, anuales, etc.
3. Establecer un nivel de truncamiento (NT) acorde con los dos puntos anteriores, que refleje la realidad de la demanda respecto a los suministros disponibles. Este NT es la referencia que distingue los eventos altos (excesos) de los bajos (sequías), también conocido como *umbral* o *nivel de referencia* (véase la Figura 2.1).
4. Estimar el alcance regional del fenómeno, ya que por lo general, la sequía abarca grandes áreas geográficas y el análisis de unos pocos sitios puede ser insuficiente para apreciar su dimensión real.

En la medida en que las sequías se han vuelto más catastróficas, o en que los sistemas de uso del agua son más vulnerables, han adquirido importancia como fenómenos que requieren análisis detallados, y aunque no se ha llegado a certezas definitivas en su tratamiento, sí se han obtenido avances importantes que permiten conceptualizar y abstraer el problema. Ello ha llevado a generar métodos e índices que de alguna manera pretenden caracterizar el fenómeno desde diversas perspectivas. Así, se han generado indicadores relacionados sólo con la lluvia, con la lluvia y la temperatura, con el agua en el suelo y las características de los cultivos, con los índices climáticos y la evapotranspiración, etcétera (WMO, 1975).

Otro enfoque interesante y útil de visualizar el fenómeno es su análisis desde diversos puntos de vista, dependiendo de quién lo hace:

El usuario del agua preocupado por obtener la cantidad suficiente y oportuna del recurso para cumplir sus metas de producción y mantener su ingreso, así como proteger las inversiones y la planta productiva, ya sea industrial, agrícola, de servicios, etc. En condiciones de escasez, la primera reacción es lograr la cantidad suficiente para sus intereses, aún a costa de los demás, con lo cual se generan los conflictos; después, ante el avance del fenómeno, buscará maneras de ser más eficiente y de participar en la búsqueda de soluciones comunes. A final de cuentas, el usuario es quien más resiente el ataque del fenómeno, y a quien

conviene mejorar sus perspectivas de uso del recurso ante situaciones de escasez, buscando alternativas que mitiguen el impacto.

El administrador u operador de sistemas hidráulicos, a quien básicamente le preocupa que los volúmenes disponibles sean suficientes para suplir los requerimientos mínimos de sus usuarios, y que no se alcancen periodos o situaciones en los que no pueda cumplir con una demanda mínima y con ello se generen los consabidos conflictos entre usos y usuarios. Su visión es de carácter práctico y se apega al buen juicio y al sentido común, a través de soluciones técnicamente viables, social y políticamente aceptables, y económicamente factibles. Para él, la planeación a mediano y largo plazos, mediante criterios y métodos fundamentados y congruentes, es la mejor opción sobre la cual diseñar y aplicar estrategias que sostengan la funcionalidad del sistema.

El investigador científico, que ve en la ocurrencia de la sequía la oportunidad de estudiar sus causas, efectos y particularidades, desde una perspectiva objetiva y rigurosamente científica e imparcial, con la aplicación de metodologías fundamentadas y consistentes. Con ello pretende probar teorías y aportar explicaciones plausibles del fenómeno y elementos de juicio que apoyen las decisiones a tomar, tanto por usuarios como por administradores del recurso. Sus métodos apoyan el mejoramiento de la planeación y, desde un enfoque imparcial y objetivo, permiten buscar y encontrar soluciones aceptables y viables ante situaciones de creciente severidad y riesgo.

También existen sutiles diferencias de apreciación del fenómeno dependiendo del ambiente en que se vive y de la estrechez o cercanía en la relación con el agua: entre los habitantes rurales y los de los centros urbanos; estas diferencias de visión también contribuyen a la complejidad en el entendimiento de la sequía, restándole objetividad a su tratamiento. Para los primeros es preocupante ver un cielo sin nubes cuando es tiempo de que llueva, ya que la insuficiente humedad les impide sembrar o ven sus plantas y animales con sed; desde entonces hacen su pronóstico de que será una temporada difícil. Para ellos, la lluvia es una bendición esperada con anhelo, sobre todo si no disponen de riego artificial, ya que de ello dependen su actividad, sus ingresos y su bienestar. Un año lluvioso significa cosechas abundantes, mayores ingresos y bienestar, progreso y estabilidad. Uno o más años secos implica carestía, hambre, falta de ingresos, abandono del campo y más pobreza.

Los habitantes de la ciudad, usuarios comunes de agua potable a través de una toma domiciliaria, en general son menos sensibles al fenómeno, sobre todo si no han tenido una relación directa o frecuente con el ambiente rural.

Comienzan a preocuparse cuando al abrir la llave del agua en casa, ven que no sale o que es muy poca; para cuando esto sucede, lo más probable es que ya la sequía está en una fase avanzada. Para ellos, la lluvia es una molestia porque interfiere con sus actividades: encharcamientos, inundaciones, falta de pavimento, congestionamiento del tráfico, y el problema de la falta de agua lo ven

como algo que debería solucionar “el gobierno”. Igualmente molesto les resulta no poder lavar con manguera sus autos, sus banquetas, y regar sus jardines, y sobre todo tener que limitarse a usar menos agua, cuando el sentimiento e idea es que deben disponer de cuanta necesiten, puesto que “la pagan”. Por lo general no existe un conocimiento del esfuerzo y costo que implica llevar el agua hasta la llave, lo que redundo en que no se tenga mucho cuidado en su uso y preservación.

Para fines de mitigar el impacto, el análisis de la sequía debe basarse en encontrar fundamentos, criterios y estrategias que pretendan dar respuesta a tres cuestiones primarias:

¿Existe actualmente un estado de sequía, o está por iniciarse?

Si la sequía existe actualmente ¿cuál es su severidad, magnitud y tiempo esperado de duración, y los efectos esperados o previsibles?

Si la sequía existe actualmente o está iniciando y se pueden estimar sus características ¿Qué es lo que se puede y debe hacer? ¿Cuáles son las estrategias y acciones más adecuadas para que el impacto sea mínimo? ¿Existen condiciones para soportar un largo periodo de escasez y cuál sería el costo de ello en términos sociales, económicos y ambientales?

Obviamente, no es posible dar respuestas categóricas a las primeras dos cuestiones, ya que la elusividad del fenómeno por su alto nivel de incertidumbre no lo permite, pero un adecuado y continuo monitoreo de las condiciones ambientales de oferta y demanda, da elementos para avizorar, al menos a corto plazo, cuáles podrían ser las perspectivas inmediatas, y con ello tomar las precauciones mínimas, de tal suerte que se actúe con reserva en la planeación y operación del recurso, en respuesta a las últimas interrogantes (Postel, 1991).

La experiencia muestra que es un alto riesgo, a menudo con resultados negativos, comprometer volúmenes más allá de lo razonable, esperando que la generosidad de la naturaleza haga el milagro. Cuando se dispone de fuentes de suministro como los embalses, es usual que los usuarios prefieran usar el agua actualmente, y arriesgarse a que en los periodos siguientes no haya la suficiente con los efectos previsibles. En análisis estadísticos es posible demostrar que así como es más probable que a un periodo húmedo le siga otro periodo húmedo, también es más probable que a un periodo seco le sigan otros del mismo tipo (Estrada-Lorenzo, 1994); es decir, si ocurre un periodo seco y se utiliza toda el agua disponible sin prever que los siguientes periodos también lo pueden ser y no se toman las precauciones mínimas razonables, el riesgo de sufrir escasez es alto.

La incertidumbre del acontecer natural es alta y compleja, y los actuales avances científicos y tecnológicos son aún insuficientes para pronosticar adecuadamente la ocurrencia de la sequía, de tal suerte que la manera actual más viable para afrontarla es la previsión. En general, la herramienta más utilizada en el análisis de la sequía como fenómeno natural es la estadística.

La aplicación de métodos estadísticos a series de tiempo o a conjuntos de datos permite dimensionar el fenómeno en términos del déficit que causa, así como la duración, severidad y magnitud relativos a un umbral determinado. En la cuantificación de la **sequía meteorológica** existen diversos métodos, entre los que destacan:

2.4.1. LOS DECILES

Que consiste en poner en orden ascendente los valores anuales o mensuales de lluvia, y dividir el conjunto en diez partes iguales.

De esta manera se tienen 10 grupos de valores (Cuadro 2.1) que convencionalmente, por la magnitud de sus valores, se clasifican así, con respecto al valor medio del total de la muestra: Así, el primer decil significa la cantidad de lluvia que no es excedida por el 10% del total, en el segundo decil la cantidad que no es excedida por el 20%, etc. (Medina y Espinoza, 1998). En términos descriptivos, la equivalencia de los deciles a la sequía puede decirse que es (WMO, 1975): incipiente para el decil 4; moderada para el decil 3; severa para el decil 2 y crítica para el decil 1.

Probablemente este enfoque como primera aproximación es útil, pero no es suficiente para describir la gravedad del fenómeno, ya que si la lluvia anual no supera el 10% de lo normal, las condiciones resultantes son más que críticas, abiertamente catastróficas. En periodos anuales se pierde precisión y objetividad; por ello este método puede tener mejor significado si los periodos de análisis son mensuales, ya que en ese lapso sí es posible apreciar las variaciones mayores que usualmente se presentan.

Cuadro 2.1. Clasificación de la lluvia según los deciles.

Decil	Interpretación	Decil	Interpretación
10	Mucho muy arriba	5 y 6	Noramal
9	Muy arriba	4	Ligeramente abajo
8	Arriba	3	Abajo
7	Ligeramente arriba	2	Muy abajo
		1	Mucho muy abajo

2.4.2. LOS PERCENTILES

En condiciones más realistas y frecuentes, los *percentiles* son más descriptivos. Si se considera que de mediano a largo plazo las variaciones tienden a atenuarse, entonces la clasificación del exceso o déficit de lluvia en percentiles puede plantearse según el Cuadro 2.2.

Esto basado en el convencionalismo, de que si el déficit para satisfacer una demanda normal es del 5 al 10%, la sequía es incipiente, del 10 al 20% es moderada, del 20 al 35% es severa, y del 35 al 50% es crítica; en complemento, se sugiere que si el déficit supera el 50%, entonces la sequía es catastrófica.

Por otro lado, la clasificación de la sequía según el área afectada al nivel de país o gran región (cuenca hidrológica) es como sigue (Medina y Espinoza, 1998), con referencia a México. Dado que usualmente el fenómeno se presenta en áreas extensas, con frecuencia abarcando cuencas hidrológicas completas, ésta clasificación puede tener la connotación de la parte derecha del Cuadro 2.3.

Cuadro 2.2. Clasificación de la sequía según los percentiles de la lluvia anual.

Percentil	Significado	Percentil	Significado
48 a 52	Normal	33 a 40	Severa
45 a 47	Incipiente	25 a 32	Crítica
40 a 44	Moderada	Menos de 25	Catastrófica

2.4.3. LA NORMAL CLIMATOLÓGICA DE PRECIPITACIÓN

Aún cuando lo “normal” se discute por ser sólo un concepto, su utilidad es manifiesta por ser estadísticamente el “valor medio” o “esperado” de que ocurra tal o cual cosa.

Dado un registro histórico de lluvia, para un periodo específico puede estimarse el valor medio que se esperaría ocurriera. Esto sería lo normal o esperado. De acuerdo con algunos autores (Linsley *et al.*, 1978), la normal climatológica debe calcularse para periodos de 30 años. Mayor tiempo puede llevar implícitos cambios naturales o antropogénicos que desvirtúen la información. Periodos menores pueden no reflejar las cualidades del fenómeno a analizar.

Cuadro 2.3. Clasificación de la sequía en función de su extensión.

Nivel país o gran región		Nivel cuenca hidrológica	
% del área afectada	Categoría de la sequía	% del área afectada	Categoría de la sequía
Menor de 10	Local	Menor de 20	Local
11 a 20	Vasto	20 a 35	Vasto
21 a 30	Muy vasto	35 a 50	Muy vasto
31 a 50	Extraordinaria	50 a 70	Extraordinaria
Mayor de 50	Catastrófica	Mayor de 70	Catastrófica

Aún cuando se pueden estimar normales climatológicas de lluvia diarias, semanales, decenales, trimestrales, o de cualquier otro periodo, lo más usual es hacerlo para periodos mensuales, que equilibran la cantidad de datos a procesar y representan el periodo de tiempo apropiado de análisis, de tal suerte que se obtiene una visión del panorama y un manejo de la situación acordes con los procesos de planeación, seguimiento y evaluación.

Las normales climatológicas mensuales de lluvia pueden ser acumuladas y sin acumular. Sin acumular dan una idea elocuente de cómo se distribuye la lluvia esperada en los diversos meses o periodos del año, y es útil para efectos de planeación, cuando es necesario formar escenarios de comportamiento de la lluvia a diversos niveles de probabilidad. Una normal de lluvia sin acumular, con 30 años de información, en combinación con la normal mensual de temperatura, conduce al climograma, representación gráfica de los dos parámetros climáticos más importantes de un lugar dado, en sus condiciones medias.

Cuando la normal anual es acumulada, es más útil para efectos de seguimiento, ya que se facilita la comparación de lo que se esperaba que lloviera hasta determinado mes, contra lo que realmente ha llovido. Dado que usualmente una sequía dura varios meses, la comparación de los valores acumulados conduce a la idea cuantitativa del tamaño del déficit. La magnitud del déficit (o exceso) tiene una importancia directa en estimar las consecuencias.

Además, referido al periodo más decisivo y que es la temporada de lluvias, el déficit que se presente durante ella tendrá mayor impacto en los usos del agua. Es decir, si durante los periodos de estiaje -antes y después de los periodos lluviosos- llueve menos, es menos determinante y riesgoso que si deja de llover en la temporada normal esperada. Así, es también fácil y útil estimar si ha habido desfases en los periodos lluviosos, su magnitud y de allí, el análisis de las repercusiones y las medidas a tomar.

Para cada mes, la normal mensual se obtiene simplemente por el valor medio aritmético de los datos disponibles. Los parámetros estadísticos adicionales, como la desviación estándar, el sesgo o asimetría, la kurtosis, el coeficiente de variación y otros, complementan el valor y utilidad del método. En este caso, el tratamiento clásico determinístico es válido porque la correlación o dependencia estadística entre los datos se ha demostrado que es baja, y que por tanto puede obviarse.

La normal climatológica comparativa de la precipitación tiene una repercusión directa en la estimación de los escurrimientos hacia los embalses. Y resulta definitivamente aún más decisiva en las áreas de temporal, que tienen una dependencia más directa de la lluvia que humedece los suelos y alimenta los cultivos de los que depende abiertamente la población y economía de esas áreas. Así, cualquier anomalía en la ocurrencia de la lluvia puede significar severas alteraciones en el campo.

2.4.4. ÍNDICE DE PRECIPITACIÓN ESTANDARIZADO (*SPI, STANDARDISED PRECIPITATION INDEX*)

Este es un índice moderno, recientemente desarrollado en la Universidad de Colorado, para dar seguimiento a la sequía meteorológica de cualquier plazo, con base únicamente en la ocurrencia de la lluvia (McKee *et al.*, 1993, 1993a).

El fundamento teórica de este índice es que, en general los registros de lluvia tienen un buen ajuste a la *función de densidad de probabilidad (pdf)* Gamma, por

lo que es entonces posible calcular para cada caso los parámetros funcionales, con los cuales se hacen las estimaciones de la cantidad de lluvia a diversos niveles de probabilidad. De hecho, la *pdf* Gamma es una de las que mejor ajuste tienen en la generalidad de los casos, cuando las lluvias son estacionales. Un requisito de esta *pdf* en su forma original es que no haya valores “cero”, y lo usual es que sí los haya -no los datos perdidos, sino cero como valor: que no hubo lluvia-, aún en las regiones típicamente húmedas.

Este inconveniente se supera al hacer las adecuaciones necesarias para llegar a la *pdf* “Gamma mixta” (Campos Aranda, 1988). Definidos los parámetros de la *pdf* Gamma, esta función es poco común utilizarla en la práctica, pero sí es posible transformarla a una *pdf* normal estándar, la conocida función llamada campana de Gauss, con media cero y varianza uno. Bajo esta transformación, los valores medios de la lluvia para un periodo dado se transforman en el cero o valor medio de la *pdf* normal estándar, y las desviaciones respectivas -mayor o menor lluvia- están representadas en términos de la desviación estándar (Edwards and McKee, 1997).

Este es un índice que está teniendo amplia difusión y aceptación en el gremio meteorológico, y está utilizándose progresivamente en las agencias y dependencias en los países desarrollados, como una alternativa fundamentada, congruente y apropiada en el seguimiento de la sequía. Instituciones como el National Drought Mitigation Center (NDMC, 1998), lo usan ya en forma común como un método estándar a escala estatal, regional y de país. De acuerdo con sus estimaciones y comentarios, es éste probablemente el mejor índice actual, en su tipo.

Desde luego, podría parecer insuficiente para determinados propósitos, por ejemplo cuando se trata de relacionarlo con el suelo y sus características, ya que únicamente toma en cuenta la lluvia, pero al considerar que la lluvia es la fuente primaria de la humedad que determina la sequía, entonces es un índice adecuado, sólo de tipo meteorológico.

La versatilidad del SPI estriba en que dado un registro continuo de valores mensuales de lluvia, que puede incluir valores “cero”, mediante programas de cómputo explícitos, se hace el ajuste a la *pdf* Gamma y luego la transformación a la *pdf* normal estándar. Lo interesante es que además de obtener el índice mensual, se tiene opciones de obtenerlo para diferentes periodos, a elección, desde un mes en adelante, aunque lo más usual es hacerlo a 3, 6, 12, 24, 36 y 48 meses. Los valores así obtenidos, dibujados en un gráfico apropiado, ilustran cómo ha sido la “eficiencia de la lluvia” retrospectivamente y a diversos periodos.

Esto conlleva a disponer del índice a diferentes escalas de tiempo. La utilidad de ello es que un índice mensual no siempre resulta ilustrativo de las condiciones reales. En las áreas de secano puede resultar más importante analizar el comportamiento de la lluvia en la estación lluviosa, digamos en el periodo julio-agosto-septiembre, y ello se puede lograr con el SPI a tres meses. Por otro lado,

visto a más largo plazo, el comportamiento anual de la lluvia mediante este índice da mejor idea de cómo se reflejaría en los escurrimientos, de especial interés para las áreas de riego.

Los valores numéricos del índice son más variables en la medida en que la escala temporal es menor; así, se tiene más variación para el SPI mensual que para el SPI anual. La razón es simple: a mayor escala, los valores se atenúan y tienden a la media. Para diversas estaciones con información, representativas de la zona afectada, una vez calculado el SPI a la escala de interés, esos valores se pueden dibujar en planos en los que se muestren líneas de isovalores del índice, y con ello se tiene una representación espacial de cómo ha sido la evolución de la lluvia, respecto a sus condiciones medias de la escala temporal elegida.

Dadas las ventajas y características del SPI, su aplicación en México es útil, y complementaría el análisis usual de la lluvia como elemento primordial de la sequía. Además, puede ser un excelente complemento de los mapas de isoyetas, ya que en referencia a un periodo determinado, además de saber cómo se distribuyó espacialmente la lluvia, si también se conoce la distribución espacial de su eficiencia respecto a las condiciones medias, entonces con ello se forma un panorama más amplio y objetivo de las condiciones de humedad.

2.4.5. ÍNDICE DE SEVERIDAD DE SEQUÍA DE PALMER

La **sequía agrícola**, está relacionada explícitamente con la insuficiencia natural de agua en el perfil del suelo, de tal manera que las plantas no obtienen la suficiente para satisfacer sus requerimientos hídricos.

Uno de los índices más ampliamente usados en USA es el conocido *Índice de severidad de sequía de Palmer (ISSP)*, desarrollado a mediados de la década de los 60's (Palmer, 1965). Aunque su valor final es sólo una cifra que muestra la gravedad de la situación hídrica, su obtención es un proceso complejo que requiere mucha información, la cual frecuentemente no existe o es incompleta, por lo que se tienen que hacer suposiciones que no siempre pueden ser acertadas o cuya generalidad ocasiona que el ISSP sea relativo. La escala de valores del índice se muestra en el Cuadro 2.4, los cuales son valores convencionales.

Este índice fue desarrollado para la región de Oklahoma, Kansas e Iowa (USA), en donde el contraste estacional es muy marcado, y por tanto existen periodos definidos de lluvia, frío, calor y estiaje. Además de la información de lluvia mensual, temperatura, evaporación y evapotranspiración, utiliza otros valores medidos o calculados, entre los que destacan:

Características del suelo: profundidad, capacidad de retención de humedad, proporción de la capa superficial respecto a la profundidad de raíces en cuanto a disponibilidad y almacenamiento de agua, recarga, escurrimiento y pérdida potencial de agua, de donde se derivan los respectivos coeficientes, dados por la relación valor real/valor potencial.

Características climáticas: evapotranspiración potencial (estimada por ejemplo, con el método de Thornthwaite), valores “climáticamente apropiados para las condiciones existentes” de evapotranspiración, etc.

Cuadro 2.4. Valores convencionales de ISSP para sequía con duración de 48 meses (Palmer, 1965).

Fase	valor de ISSP
Incipiente o inicial	-1.0
Moderada	-2.0
Severa	-3.0
Extrema	-4.0

El *ISSP*, aplicado en condiciones diferentes a donde fue desarrollado, requiere una calibración que no siempre es posible hacer, por no disponer de la información necesaria, o bien, porque los conceptos en los cuales está basado el índice no son aplicables u obtenibles. La gran variabilidad de los suelos tanto en el perfil como en la extensión es una severa limitante, y suponer valores medios o de otro tipo dan resultados no siempre adecuados. Los parámetros intermedios que adicionalmente se requieren, obtenidos de los valores reales y potenciales de las variables, hacen complejo y difícil el proceso de calibración y cálculo.

Básicamente, el *ISSP* es un balance mensual de los diversos componentes hidrológicos relacionados con las condiciones meteorológicas y edáficas, así como con los cultivos en términos de su consumo de agua. Por ello, a pesar de basarse en conceptos climatológicos, es un índice fundamentalmente agrícola, en que si el balance resulta negativo durante varios meses seguidos, conduce a una situación de sequía agrícola, pero cuando las condiciones meteorológicas propician el aumento de la humedad del suelo hasta satisfacer las necesidades evapotranspirativas, entonces la sequía desaparece y el índice pasa a ser positivo.

Además, la evapotranspiración se calcula, no se mide, es específica por cultivo y depende de muchos factores del suelo, de la propia planta y de la atmósfera; por ende sus estimaciones difieren de un método a otro, lo que agrega relatividad e incertidumbre al método y al índice. La publicación de WMO (1975), cita otros métodos para la sequía agrícola, como el de Thornthwaite, Fitzpatrick y Baier-Robertson, así como el de Palmer, que básicamente son métodos de balance de agua. En el Apéndice I de la misma referencia (WMO, 1975), WMO, muestra una amplia e interesante relación de métodos o índices, por autor y con respecto al enfoque o parámetros principales: lluvia, lluvia y temperatura, agua en el suelo y características de las plantas, índices climáticos y evapotranspiración, etcétera.

Diversos autores y estudios (por ejemplo, NDMC, 1998) hacen comparaciones entre el *ISSP* y el *SPI*, en donde se llegan a conclusiones casi definitivas en el sentido de que a pesar de su importancia, la complejidad y

supuestos del *ISSP*, lo ponen en desventaja frente a la simplicidad y versatilidad de *SPI*, el cual da una idea más intuitiva del fenómeno.

A partir de estos hechos, el *SPI* está desplazando al *ISSP*, y quizá sólo en la medida en que se pueda disponer de la información requerida por el *ISSP*, en la cantidad y calidad adecuadas, sería posible obtener el índice que fuera realmente representativo de las condiciones analizadas.

2.4.6. OTROS MÉTODOS DE ANÁLISIS

En cuanto a la **sequía hidrológica**, los métodos de análisis son más específicos y pueden caracterizarse para cada condición o situación en que se aplique.

Cuando se trata de las *aguas subterráneas*, el indicador más directo de la sequía es la baja en los niveles piezométricos, que indica el desequilibrio entre las entradas al acuífero y las extracciones. El seguimiento en la evolución de los niveles indica el abatimiento en el tiempo, el cual al ser representado espacialmente, da una idea aproximada de la tendencia en función de la extracción. Los sistemas de uso de agua del subsuelo, cuando no hay una recarga que compense la extracción, pueden tener severas consecuencias en la disponibilidad de agua.

Debe tenerse presente que hay un desfase significativo entre la ocurrencia de la lluvia, la infiltración y percolación profunda, y su respuesta en el nivel piezométrico. Pueden pasar meses e incluso años antes de que el agua superficial se convierta en subterránea, en el sentido estricto del concepto, debido a las bajas velocidades con que el agua viaja en el subsuelo. Esto tiene la implicación de que ante una insuficiencia de agua superficial o un aumento sensible de la demanda, la mayor explotación del acuífero tarde en manifestarse, pero también es cierto que la recuperación será a largo plazo.

Esto lleva a la recomendación directa de la cautela que debe tomarse en la extracción de agua subterránea. En otras palabras, la sobreexplotación en tiempos de sequía tiene efectos perniciosos a largo plazo, más allá de la duración de la sequía meteorológica o agrícola. Por causas imputables a la sequía, cuando los acuíferos se explotan más allá de lo razonable y por un lapso prolongado, y se rompe el equilibrio entre extracción y recarga, llegan eventualmente al estado de incosteabilidad económica por los profundos niveles de bombeo, y también a la inutilidad de los mismos, por efecto de la contaminación, ya sea por aguas fósiles o por intrusión salina.

En cada acuífero explotado, debe llevarse sistemáticamente el registro de medidas de nivel, tomadas una o varias veces durante el año, en una época en que puedan dejar de operarse todos los pozos por varios días, a efecto de que las mediciones hechas reflejen un supuesto estado estable del acuífero. Con estas mediciones, referenciadas geográficamente, y con los valores de profundidad del agua, tanto respecto a la superficie del suelo como al nivel del mar, se forman

planos que muestran la evolución de los niveles. Estos planos son los elementos más descriptivos para diseñar y apoyar las acciones y estrategias que permitan moderar las extracciones y el uso de esta agua.

Las medidas de abatimiento (usualmente expresadas en metros/año) son los parámetros más a propósito para evaluar la sequía relacionada al agua subterránea. Ésta es el agua más cara, después de la que no se tiene, y la fuente que tiene un periodo de retorno más largo, de manera que su cuidado, uso y preservación deben ser considerados de alta prioridad e interés. Esto implica propiciar la recarga al acuífero, ya sea por medios naturales, como es la retención de la lluvia en donde se produce, para dar oportunidad a su infiltración hacia las capas profundas del subsuelo, o bien mediante la recarga inducida artificialmente, que se puede hacer por medio de pozos de inyección o bien por entarquinamiento del agua en zonas de alta permeabilidad (las llamadas *cajas de agua*, Palerm, 2001).

Respecto al *agua superficial*, que en general tiene una dinámica más intensa, con periodos de análisis mensuales y anuales, puede darse seguimiento y evaluar la sequía a través de hacer balances entre oferta y demanda. La información hidrológica histórica relativa al escurrimiento en ríos y aportaciones a las presas, por un lado, y las extracciones o derivaciones controladas de los embalses por otro, son los elementos básicos que permiten establecer comparaciones entre ambos y establecer las reglas operativas que permitan un funcionamiento integral equilibrado.

La función reguladora de las presas permite retener y almacenar el agua producto del flujo superficial, sobre todo en la época de lluvias, para utilizarlo más tarde, cuando la demanda es alta. Las aportaciones son en general muy variables, presentándose eventualmente picos positivos en los excesos y negativos cuando hay déficit. Analizada como serie de tiempo, la información de entradas da la pauta de comportamiento de los escurrimientos, que aunque de un año a otro presentan patrones similares -periodos alternos de estiaje y abundancia-, vistos en conjunto y en perspectiva, existen marcados periodos multi-anales de menor aportación, así como bruscos picos positivos por periodos más cortos de exceso.

El análisis de la secuencia de eventos en general muestra que no hay un patrón definido a largo plazo, o al menos no tan evidente, es decir, la tendencia o ciclicidad es mínima o nula, lo cual confirma el carácter errático tanto de la sequía como del exceso. Tampoco hay una regularidad clara en la ocurrencia de estos fenómenos, a pesar de cierta creencia de los periodos alternativos de siete años (de aquí el conocido dicho de los siete años de vacas flacas, en alusión al pasaje bíblico), aunque también se dice que ocurren cada once años. Si esta periodicidad existe, probablemente esté muy relacionada con la ocurrencia de *El Niño*, y probablemente influenciada por la ocurrencia de las manchas solares, pero esta teoría aún no se ha comprobado. En todo caso, si existe algún comportamiento explicable y quizá predecible, no es obvio.

Quizá debido a estas características, los intentos por analizar la sequía con los métodos típicos de carácter estocástico no han tenido mucho éxito: no alcanzan a explicar del todo el fenómeno. Esto es probablemente una manifestación más de lo complejo de la sequía, así como de su elusividad y relatividad, sin trayectoria, sin epicentro y sin inicio definidos. Un importante esfuerzo en este sentido es el hecho por Guerrero y Yevjevich (1975) en su análisis de las sequías a través de la *teoría de las rachas*.

Las extracciones de un embalse son procesos controlados, que obedecen o debieran obedecer a un programa previo, en el que se asignan volúmenes específicos en tiempos determinados para cada uso, a su vez en función de la demanda y con criterios definidos de asignación. Por tanto, en este componente hay más regularidad, y es un proceso previsible, programable y bajo control.

Obtener los parámetros estadísticos de una muestra de valores de aportaciones, anuales por ejemplo, permite conocer la media, variación y sesgo, y sobre el valor medio pueden establecerse anomalías: positivas en los excesos y negativas en los déficit. Esto en sí mismo es una manera de caracterizar el fenómeno: las desviaciones o diferencias de cada periodo respecto a su media. Sin embargo, esto es válido cuando a la sequía se le trata sin relación a sus efectos en la sociedad, sino como el simple fenómeno natural.

Si el mismo tratamiento paramétrico se hace para las extracciones, los valores obtenidos de los parámetros son en general menores a los de las aportaciones: menor media y menor variación. También en este caso es posible obtener las anomalías de la extracción, como demanda, respecto al valor medio, pero ello no es suficiente si no se relaciona con la oferta.

Relacionar o comparar ambos aspectos, oferta y demanda, a pesar de las diferencias de origen como fenómenos, conduce intuitivamente a la idea del déficit: el efecto de la sequía natural en las actividades humanas cuando la oferta es insuficiente para satisfacer la demanda. De aquí entonces que un *umbral, nivel de referencia o de truncamiento* sea más válido para la sequía hidrológica, cuando se toma la media de las extracciones. La idea que justifica este concepto es que dado un sistema de aprovechamiento del agua a través de un embalse, para suplir la demanda media, se requiere al menos tener la aportación media del mismo periodo (obviamente ésta es mayor que aquélla). Valores de aportación superiores a la extracción media significan un exceso, mientras que valores inferiores significan un déficit. Bajo este criterio, el déficit puede cuantificarse en los parámetros que describen la sequía:

Duración: el tiempo continuo en que la aportación es inferior a la extracción media.

Severidad: valor acumulado total del déficit en el periodo de duración.

Magnitud: valor promedio del déficit; severidad entre duración.

Extensión: área geográfica en que se presenta el fenómeno

Con estas ideas es entonces factible evaluar las sequías presentadas en el periodo de análisis. Usualmente, sobre todo en las zonas donde es muy marcado el estiaje -donde los ríos bajan significativamente su caudal e incluso se secan-, evaluar los periodos de déficit tampoco conduce a definir alguna periodicidad en su comportamiento; son sensiblemente aleatorios.

Desde luego, la media de las extracciones es un umbral lógico, pero no el único. Dependiendo de qué tan elástica sea la demanda, podrá haber otros umbrales, incluso diferentes o variables en el tiempo. La diferencia de valores entre la media de las aportaciones y la de extracciones corresponde principalmente a las pérdidas por evaporación y filtración sobre el vaso. En la medida en que el tamaño hidrológico de la presa ($TH = \text{capacidad útil} / \text{aportación media}$) es mayor que la unidad, la probabilidad de derrames es menor. Si TH es menor que la unidad significa que los derrames de la presa son o pueden ser frecuentes, es decir, que la presa es insuficiente para almacenar toda el agua que escurre aguas arriba.

Otro factor importante de tener presente es que en general, el agua captada por una presa durante un año es para utilizarse en el siguiente; es decir, hay un desfase que precisamente es la capacidad de regulación del embalse. Por ello, en estos casos se dice que un año malo (seco) trae consecuencias negativas para el que sigue. Esto se refleja en las políticas de operación de las presas y los funcionamientos analíticos de los vasos, donde el agua se asigna previamente según el comportamiento hidrológico del ciclo registrado y del esperado inmediato.

Una cualidad importante del escurrimiento superficial, a diferencia de la lluvia, es que en general sí hay dependencia temporal: los valores (mensuales) previos influyen sobre los posteriores, y mientras más cercanía en el tiempo, mayor la dependencia, lo que se evidencia por el coeficiente de correlación serial, un parámetro específico de las series de tiempo. En este sentido, los modelos estocásticos (auto-regresivos: AR, ARMA, ARIMA, etc [Salas *et al.*, 1980]) tienen al citado coeficiente como parámetro básico. La aplicación de estos modelos tiene utilidad en la planeación, aunque la gran incertidumbre del acontecer hidrológico limita sus alcances.

La **sequía económica** junto con la **social**, es la manifestación más tangible de la sequía natural y su correspondiente efecto antropogénico. Los impactos de la insuficiencia del agua se traducen en menor producción e ingreso, ya que los volúmenes disponibles durante el periodo no alcanzan a satisfacer toda la demanda en condiciones normales, y por ende hay restricciones que finalmente inciden en que la producción disminuya, y con ello se manifiestan sus impactos, desde una leve inconveniencia hasta los efectos más dramáticos.

De esta manera, la evaluación de la sequía económica es con base principalmente en conceptos económicos: productividad, eficiencia, ingreso, desempleo, etc. Un efecto típico del fenómeno es el alza en los precios de los productos, por disminución de la oferta, la tan conocida carestía. Así, el ingreso y

el consumo *per cápita* durante periodos específicos bajan como consecuencia del déficit. El desempleo aumenta, así como el abandono del campo, la desaparición de los hatos ganaderos y la producción pecuaria, y aumenta la migración hacia los centros urbanos.

El producto interno bruto (PIB) es uno de los parámetros que en términos económicos describen la actividad económica y productiva. La sequía es un factor importante de que el PIB disminuya y de que haya alteraciones sensibles entre los diversos sectores económicos.

Para la agricultura de riego, el sector que más agua demanda y consume, los análisis económicos en términos de superficies regadas, de volumen de la producción, de valor de la producción, de jornales utilizados y de productividad del recurso, dan indicadores del impacto de la sequía, y reflejan quizá más que en los otros usos, que la insuficiencia de agua tiene severos efectos negativos en un sector totalmente dependiente del recurso.

En términos sociales, si el ingreso disminuye, trae consigo problemas de baja en el poder adquisitivo, pobreza, desnutrición, marginación y hasta pérdida de valores humanos y culturales. El crecimiento de las zonas urbanas, de forma caótica, en gran medida se da por la migración del campo, y crea problemas adicionales en cuanto a los servicios, empleo, calidad de vida y bienestar en general. Frecuentemente, los recursos municipales no alcanzan para satisfacer aún las necesidades más básicas, y las condiciones de vida empeoran, sobre todo las de carácter sanitario.

Esto es un círculo vicioso que frecuentemente tiende a aumentar la recurrencia y persistencia de la sequía, así como la descapitalización del campo y la cada vez mayor dificultad de encontrar apoyos para activar la economía rural; la creciente vulnerabilidad del sector agrícola y rural ante el incremento de la demanda de agua y el cambio de uso del recurso hacia los centros urbanos e industriales en donde adquiere más valor, todo ello confluye en que el campo sea cada vez más abandonado, o se concentre en unas pocas manos, alejándose de su propósito social. Entre otras razones, a esto se debe a que cada vez haya más campesinos sin tierra, que son simples asalariados y mano de obra barata y no especializada, que en casos de insuficiencia de agua, son los que más resienten sus efectos.

Así, los parámetros de bienestar social usuales (educación, vivienda, servicios, ingresos y poder adquisitivo, principalmente), aunque también pueden deberse a otros factores, en el caso de la sequía se manifiestan como efectos directos. Si los niveles mínimos de bienestar no se alcanzan por causa de la sequía, entonces ésta es crítica o catastrófica.

En relación a los demás tipos de sequía (**ecológica** o **ambiental** y **recreativa**), los métodos de análisis son aún incipientes, porque en caso de insuficiencia de agua la prioridad la tienen los otros usos. No obstante, es

importante tener presentes los impactos potenciales en el paisaje y la biota, ya que se pueden tener repercusiones severas en relación con el equilibrio natural. En este sentido, el *gasto ecológico* es el parámetro base sobre el cual se estiman las condiciones de presencia y flujo de agua en los cauces y depósitos naturales, que garanticen una población mínima de las especies naturales, sobre todo las propias del área, que en muchos casos son endémicas.

Sin embargo, aún no hay consenso en cuanto a los criterios y métodos: dado el carácter de prioridad, es difícil asignar alguna cantidad al “desperdicio” -desde el punto de vista de que no produce beneficios económicos tangibles-, cuando esa misma agua se podría aprovechar con fines más productivos y de bienestar social. Esto es parte de la cultura ecológica y del agua: no estamos preparados ni conscientes de qué tan importantes son los aspectos humanos, económicos y sociales como los naturales. No distinguimos claramente la importancia que tienen en el medio ambiente los organismos que se desarrollan en condiciones naturales, y que la actividad humana ha destruido, desplazado o alterado. No obstante es una verdad que a final de cuentas se cumple: la naturaleza siempre se cobra las deudas por los daños que el hombre le inflige. Visto de otra manera, una sequía es la prueba patente de la fragilidad e impotencia del ser humano ante la grandeza y poder de una naturaleza presuntamente dominada. Esto es una concepción errónea: es el hombre el que debe adaptarse a las posibilidades del medio natural, y no romper el equilibrio que existe, so pena y riesgo de que el costo lo tenga que pagar, sin discusión.

Finalmente, puede considerarse el concepto de *sequía operativa* como el período durante el cual se permanece en estado de fallo en un sistema desarrollado de uso del agua. La sequía operativa puede ser la consecuencia de una sequía hidrológica, cuando se altera la rutina operativa de las obras, pero no necesariamente siempre es así, puesto que el fallo en un uso puede también tener su origen en un mal diseño del sistema, en una mala gestión o planeación, o en un accidente, así como por la combinación de dos o más de estas causas.

Esto conduce a la idea de que con frecuencia, los efectos de la sequía no sólo se deben al fenómeno por sí mismo, sino también a las fallas humanas, ya sea desde la fase de planeación hasta la ejecución de los programas.

Por ello, no es raro que los efectos tiendan a exagerarse, a veces con tal de obtener mayor apoyo de los gobiernos, o de lograr beneficios mayores a los prudentes, los usuarios del agua magnifican los impactos. Incluso hay quienes pueden ver en la sequía la oportunidad de obtener ganancias que de otra manera no llegarían: cuando la sequía se toma como una bandera política y los gobiernos intervienen para proporcionar auxilio a los afectados, eso puede convertirse en una fuente de lucros adicionales para algunos, a costa de otros que sí requieren esos apoyos. Esta exageración del fenómeno, por tanto, significa pingües utilidades para unos pocos, y una real calamidad para otros muchos; en otras palabras, es un río revuelto.

2.5. LITERATURA CITADA

Acosta Godínez, A. 1988. El Niño: sus Efectos sobre el Norte de México. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. XXX, Núm. 100, I Época. enero-abril. Págs. 13-23.

Campos Aranda, Daniel. F. 1988. Función de distribución de probabilidades Gamma Mixta: soluciones y aplicación. X Congreso Nacional de Hidráulica. Morelia. Mich. Vol. 2, pp 141-151.

Dracup, John A; Kil Seong Lee; and Edwin G. Paulson, Jr. 1980. On the Definitions of Drought. WRR 16(2):297-302

Edwards, Daniel C., and Thomas B. McKee. 1997. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. Climatology Report No. 97-2. Colorado State University. Department of Atmospheric Science, Paper No. 634. 155 pp.

Escalante, Carlos, y Lilia Reyes. 1998. Identificación y análisis de sequías en la Región Hidrológica Número 10, Sinaloa. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XIII, Núm. 2, II Época, mayo-agosto, págs. 23-43.

Estrada-Lorenzo, Federico. 1994. Garantía en los sistemas de explotación de los recursos hidráulicos. Centro de Estudios y Experimentación en Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. Madrid, España.

Fullen, M. A., and D. C. Mitchell. 1994. Desertification and Reclamation in North-Central China. AMBIO, Vol. XXXIII, No. 11.

Gibbs, W. J. 1975. Drought - Its Definition, Delineation and Effects. In WMO: Drought. Special Environmental No. 5. Lectures presented at the Twenty-six session of the WMO Executive Committee. WMO No. 403: 1-40.

Goldman, D. 1985. Stochastic Analysis of Drought Phenomena. The Hydrologic Engineering Center. Corps of Engineers. Training document No. 25. Davis, CA., USA.

Guerrero-Salazar P., and V. Yevjevich. 1975. Analysis of Drought Characteristics by the Theory of Runs. Colorado State University. Hydrology Papers. Fort Collins, Co., USA. 44 pp.

Klemeš, C. W. 1973. Applications of Hydrology to Water Resources Management. WMO - No. 356. Operational Hydrology Report No. 4. Geneve, Switzerland.

Linsley, R., M. Kholer, and J. Paulus. 1977. Hidrología para ingenieros. E. McGraw-Hill Latinoamericana, S. A. México. 386 pp.

Managing Risk. 1997. Guide to Crop Insurance. Being Prepared. National Crop Insurance Services. USA.

McKee, T., N. Doesken, and J. Kleist. 1993. Drought Monitoring with Multiple Time Scales. American Meteorological Society, 9th Conference on Applied Climatology. pp. 233-236.

McKee, T., N. Doesken, and J. Kleist. 1993a. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. American Meteorological Society, 9th Conference on Applied Climatology. pp. 179-184.

Medina, A., y J. Espinoza. 1998. Distribución de la sequía en México. Tlaloc, AMH, Año V, Núm. 12, mayoagosto, pp. 23-26.

NDMC. 1998. National Drought Mitigation Center. Página web del NDMC www.drought.unl.edu Universidad de Nebraska.

Palerm Viqueira, J. 2001. Administración de sistemas de riego: tipos de autogestión (nuevas noticias). XI Congreso Nacional de Irrigación, artículo ANEI-S70105. Guanajuato, Gto. México.

Palmer, W. C. 1965. Meteorological Drought. U. S. Department of Commerce. Weather Bureau. Research Paper No. 45. Washington D. C. 58 pp.

Postel, Sandra. 1991. Administración del agua en épocas de escasez. IMTA. Colección Universo del Agua. Serie Agua y Ecología. Traducción de Virginia Ugalde. Jiutepec, Mor. Mexico. 71 pp.

Salas, J. D.; J. W. Delleur; V. Yevjevich; and W. L. Lane. 1980. Applied Modeling of Hydrologic Time Series. Water Resources Publications. Littleton, Co. USA. pp. 484.

Sangoyomi, T. B. and B. L. Harding. 1995. Mitigating Impacts of a Severe Drought on Colorado River Water Resources. Water Resources Bulletin, AWRA. Vol. 31, No. 5, p. 925-938.

“Se espera otra visita de El Niño”. 1994. Agrosíntesis, Vol. 25, Núm. 11, pp30-31.

Velasco-Molina, Hugo A. 1991. Las zonas áridas y semiáridas. Sus características y manejo. Editorial Limusa, S.A. de C. V. México. 725 pp.

Velasco, Israel, y Jaime Collado. 1998. Elementos de planeación para afrontar sequías. XV congreso Nacional de Hidráulica. Oaxaca, Oax. México.

Wilhite, Donald A. 1993. Preparing for Drought: a Guidebook for Developing Countries. EarthWatch Climate Unit. UNEP. Lincoln, NE., USA. pp 78.

Wilhite, Donald. 1997. Improving drought management in the West. The Role of Mitigation and Preparedness. NDMC. Report to the Western Water Policy Review Advisory Commission. p. 46.

WMO. 1975. Drought and Agriculture. Technical Note No. 138. WMO - No. 392. Geneva, Switzerland.

3. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA SEQUÍA

MC. Guillermo Medina García
Investigador del programa de Potencial Productivo
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias
gmedina@inifapzac.sagarpa.gob.mx

Dr. J. Ariel Ruiz Corral
Investigador del programa de Potencial Productivo
Campo Experimental Centro de Jalisco
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

MC. Ángel G. Bravo Lozano
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

3. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA SEQUÍA

Guillermo Medina García
J. Ariel Ruiz Corral
Ángel G. Bravo Lozano

3.1. INTRODUCCIÓN

La sequía es un condición natural en algunas regiones del mundo y de nuestro país, y no se debe ver como un problema, sino como una condición natural, producto principalmente de la ausencia o irregularidad de la precipitación y el exceso de la evaporación, cuyo control está en forma práctica fuera de nuestro alcance y cuyos efectos pueden ser modificados en forma paulatina ya sea para mejorar o para empeorar esta condición, por el manejo del suelo, del agua y la planta.

A causa de la naturaleza incierta de la sequía, no pensamos en ella del mismo modo que acerca de otras catástrofes relacionadas con el tiempo, tales como huracanes o inundaciones. Sin embargo, aunque las sequías pueden ser menos espectaculares, a menudo pueden ser más dañinas que otros tipos de desastres naturales.

Los efectos negativos que recurrentemente causan las sequías en diferentes partes del mundo es motivo de alarma y preocupación entre la población y sus gobernantes. Sin embargo, esto se olvida poco tiempo después (Sivakumar, 1992), y no se toman acciones preventivas para disminuir los efectos de posteriores sequías.

Este fenómeno se presenta tanto en países en desarrollo, entre ellos México, como en los desarrollados (Hare, 1985), aunque en estos últimos, los efectos no son tan destructivos, gracias a las medidas preventivas y a la rapidez con que aplican medidas correctivas.

México es muy vulnerable a la acción de las sequías debido a su localización geográfica. Se sabe que desde las primeras civilizaciones prehispánicas, se padecía de este fenómeno en sus diferentes manifestaciones (Castorena, *et. al.*, 1980).

En los últimos años, la sequía ha adquirido una gran importancia por los daños que ocasiona, los que con frecuencia superan en magnitud a los que producen otros fenómenos hidrometeorológicos. Este fenómeno se torna más amenazador por el calentamiento atmosférico asociado al cambio global, entre cuyas secuelas el aumento en la frecuencia de sequías en determinadas zonas del planeta, es uno de los más serios problemas que enfrentará la humanidad, en especial los países ubicados en las zonas subtropicales, donde los altos niveles

de radiación solar y evaporación se combinan con escasas precipitaciones y favorecen la recurrencia de periodos prolongados de sequía en áreas extensas (Salati y Nobre, 1991).

La necesidad de conocer la superficie y distribución de las zonas áridas y semiáridas de México ha originado la creación de diversos planos de zonas climáticas, con el propósito de saber que tipo de manejo debe darse a cada zona, así como su susceptibilidad a determinados desastres naturales, como es el caso de la sequía recurrente. Para ello se generaron y compararon mapas de este tipo siguiendo la metodología de clasificación propuesta por diferentes autores.

El objetivo del presente trabajo es proponer un esquema de estratificación de ambientes áridos y semiáridos para utilizarse en la descripción agroecológica, planeación de la investigación y transferencia de tecnología del país, con el propósito de que esta información sea utilizada en planes o programas que tratan de mitigar los efectos de la sequía.

3.2. DEFINICIÓN DE SEQUÍA

La sequía es un evento climático incierto. A menudo los efectos de la sequía en la economía y en el medio ambiente, no son inicialmente percibidos, pero al finalizar el período seco estos pueden ser increíblemente costosos y devastadores. En la sequía, sus causas y efectos, Tannehill (1947) escribió: "No tenemos una buena definición de lo que es la sequía. Podemos verazmente decir que escasamente conocemos una sequía cuando la vemos. Le damos la bienvenida al primer día con sol después de una racha lluviosa. Los días sin lluvia continúan durante un tiempo y nos sentimos encantados de tener tan buen tiempo durante un período prolongado. Esto se mantiene y ya nos preocupamos un poco. Unos pocos días más y estamos en problemas. El primer día sin lluvia en un período de buen tiempo contribuye tanto como el último día con la sequía, pero nadie sabe cuán grave será hasta que el último día seco haya pasado y las lluvias vuelvan de nuevo... no estamos seguros al respecto hasta que las cosechas se hayan secado y muerto".

La dificultad para reconocer el comienzo o final de una sequía radica en la falta de una definición clara de la misma. La sequía puede ser definida por las cantidades de lluvia, las condiciones de la vegetación, la productividad agrícola, la humedad del suelo, los niveles en reservorios y los caudales o impactos económicos. En los términos más básicos, una sequía implica un déficit significativo en la disponibilidad de humedad debido a lluvias menores que lo normal. Sin embargo, aún esta simple definición se ve complicada cuando se intenta comparar las sequías en regiones distintas. Por ejemplo, condiciones de sequía en un lugar significarían ¡condiciones de humedad para los desiertos! (NOAA, 2004).

La definición conceptual y específica de sequía es difícil de precisar, debido al gran número de factores que intervienen en ella. Algunas variables que más se emplean para evaluar la sequía, sola o combinadas son: precipitación,

temperatura del aire, humedad del aire, evaporación en superficies libres, evapotranspiración, humedad del suelo, viento y escurrimientos.

Algunas definiciones hacen intervenir el tiempo, mientras que otras son independientes de él. Muchas definiciones de sequía varían de un lugar a otro, de un cultivo a otro y de un campo científico a otro.

Sequía es una situación en la cual, la disponibilidad de agua es insuficiente para satisfacer las necesidades de las poblaciones de plantas, animales y de seres humanos, que se encuentran condicionados por su modo de vida, distribución y aprovechamiento de las tierras.

También puede decirse que la sequía es un fenómeno temporal que resulta de la escasez o mala distribución prolongada de la precipitación. Las anomalías de precipitación se asocian generalmente, con alteraciones en el comportamiento de los sistemas meteorológicos que controlan el clima en los niveles de macro escala, mezo escala o local. En consecuencia, algunas sequías son de naturaleza localizada y sólo duran períodos cortos. Otras, están extendidas por zonas muy grandes y persisten durante largos lapsos de tiempo.

Basados en diversas disciplinas científicas o en la actividad económica que la sequía afecta como en la agricultura, ganadería, industria, recreación, turismo, etc., se han establecido varias definiciones, desde diversos puntos de vista (INETER, 2004).

3.3. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA E ÍNDICES DE ARIDEZ

3.3.1. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA

No existen dos lugares en el mundo que experimenten el mismo clima, aunque es posible identificar áreas con climas similares. Este método de agrupación o analogía se denomina “clasificación climática”. Generalmente se elabora una clasificación para resolver algún problema específico, como por ejemplo, el estudio de las interrelaciones entre el clima y la vegetación. Sin embargo, resulta imposible lograr una clasificación completamente satisfactoria para todo tipo de aplicaciones, aunque cualquier sistema que se elabore, debe tener una aplicación fácil, basarse en principios meteorológicos, reunir datos prácticos y fáciles de manejar, limitarlos y dirigirlos a objetivos bien definidos (Griffiths, 1985).

Como una herramienta fundamental de la ciencia, la clasificación tiene tres objetivos interrelacionados: ordenar grandes cantidades de información, agilizar la recuperación de la misma y facilitar la comunicación. La clasificación de cualquier aspecto ecológico comparte estos objetivos. Implica la organización de datos ambientales en tal forma que se puedan realizar generalizaciones, tanto descriptivas como analíticas, e intenta almacenar información ordenadamente para facilitar la consulta y comunicación, frecuentemente en la forma de mapas. Por ejemplo, en el caso del clima, el valor de un arreglo sistemático de climas está

determinado principalmente por el uso que pretende dársele; esto es, que un sistema que es adecuado para un propósito no necesariamente es útil para otro (Critchfield, 1983).

De acuerdo con ICRISAT (1980), citado por Villalpando (1985), los sistemas de clasificación climática varían de acuerdo al propósito para el cual son diseñados. Para fines agrícolas las clasificaciones climáticas pueden agruparse dentro de los tres tipos siguientes: 1) clasificaciones para diferenciar macroclimas, 2) clasificaciones para evaluar el potencial climático de una región para la agricultura y, 3) clasificaciones para uso en la transferencia de tecnología agrícola.

Resulta obvio pensar que para representar cabalmente la variación climática a través de un sistema de clasificación deban incluirse todos o la mayor parte de los elementos y factores climáticos. Sin embargo, esto no sería posible debido a la limitación de encontrar toda la información requerida y, porque el propósito de una clasificación climática es el de representar en forma objetiva y sucinta las diversas variantes del clima encontradas en el mundo (Ruiz, 1988). Por lo tanto, es necesario seleccionar los criterios que sean más significativos para los propósitos de la clasificación; esto con el fin de no incrementar exageradamente la cantidad de tipos climáticos posibles (Griffiths, 1994). Utilizar todos los factores y elementos del clima y fenómenos meteorológicos en la clasificación originaría una enorme variedad de climas, los cuales no podrían ser representados a nivel macroclima (Ruiz, 1988).

Por lo general, los sistemas de clasificación climática que se han generado hasta el momento, se basan fundamentalmente en datos de temperatura, precipitación y evaporación. No obstante, los datos de la variable evaporación normalmente no se encuentran disponibles en todo tipo de estaciones meteorológicas, como sucede con las variables temperatura y precipitación.

Así se tiene que se han hecho diferentes intentos de clasificar el clima para ubicar las zonas áridas y semiáridas.

3.3.2. ÍNDICES DE ARIDEZ

Debido a la gran importancia de la humedad para los cultivos y a las consecuencias de la falta de ésta, es natural relacionar el rendimiento de los cultivos con la ocurrencia y severidad de las sequías, la cual es comúnmente expresada en términos de índice.

Byun y Wilhite (1999) hacen un resumen de algunos índices de sequía: La mayoría de los índices de sequía están basados en variables meteorológicas o hidrológicas. Entre ellos se incluyen al índice de severidad de la sequía de Palmer (Palmer Drought Severity Index - PDSI), (Palmer, 1965), Índice de anomalía de la lluvia (Rainfall Anomaly Index - RAI), (Van Rooy, 1965), deciles (Gibbs y Maher, 1967), índice de humedad de los cultivos (Crop Moisture Index - CMI), (Palmer, 1968), índice de sequía de Bhalme y Mooly (Bhalme and Mooly Drought Index - BMDI); (Bhalme y Mooly 1980), índice de suplementación de agua superficial

(Surface Water Supply Index – SCSII); (Shafer y Dezman, 1982), índice nacional de lluvia (National Rainfall Index – RI), (Gommes y Petrassi, 1994), índice estandarizado de la precipitación (Standardized Precipitation Index – SPI), (McKee et al., 1993, 1995), y el índice de reclamación de sequía (Reclamation Drought Index - RDI), (Weghorst, 1996).

Cabe señalar que estos índices de sequía no son utilizados para clasificar o definir donde están las zonas áridas y semiáridas, sino que más bien son utilizados para realizar un monitoreo de las condiciones del ciclo actual de lluvia comparado con la serie histórica de datos de una estación dada. En este caso, el enfoque es hacia una clasificación y ubicación de las zonas áridas y semiáridas, en las cuales normalmente se presentan problemas de sequía.

En 1991, el Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas, UNEP (UNEP, 1992; WMO, 1993; citados por Williams y Balling, 1996) define a las tierras de acuerdo a su grado de sequedad o aridez, en base al cociente precipitación anual media/evapotranspiración anual media (Cuadro 3.1.).

En 1994 la Convención Mundial de Lucha Contra la Sequía y la Desertificación (CMLSD) realizó una reunión con el objetivo de uniformizar a nivel mundial la cartografía y definición de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Se adoptó la metodología propuesta por UNEP en 1991, la cual a su vez se basa en el índice de aridez, metodología desarrollada por Thornthwaite (1941) y adoptada para la elaboración del Atlas Mundial de la Desertización, publicado por el PNUMA. La relación precipitación/evapotranspiración es actualmente la oficial a nivel mundial, aunque deja a criterio de cada país el método de cálculo de evapotranspiración, ya que depende en gran medida de la disponibilidad de datos climatológicos existentes. En México se adoptó esta propuesta y se publicó en el Diario Oficial de la Federación de fecha 1 de junio de 1995.

Medina et al (1998) desarrollaron una clasificación de ambientes basada en el componente climático, con la finalidad de contar con un esquema de estratificación adecuado y práctico para la planeación de la generación y transferencia de tecnologías agropecuarias y forestales. El esquema de estratificación de ambientes se diseñó de tal manera que pudiera ser simple, práctico y de terminología familiarizada a los quehaceres de investigación. No obstante que el estudio se enfoca hacia las áreas agropecuaria y forestal, el esquema puede ser aplicado a otras áreas. La clasificación se basa en tres niveles de estratificación: 1) temperatura del mes más frío, 2) disponibilidad de humedad y 3) temperatura media anual.

De Martonne (1926) desarrolló un índice de aridez basado en precipitación y temperatura a manera de balance hídrico para estratificar los tipos de vegetación. Este índice ha tenido utilidad entre otras cosas, para la delimitación de zonas áridas, tal es el caso de los trabajos de Schmidt (1991), quien utilizó el índice de De Martonne para delimitar los desiertos de Chihuahua y Sonora.

3.4. METODOLOGÍA

Se presenta la metodología para la obtención de las zonas áridas y semiáridas de acuerdo a la. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (UNEP, 1992), la metodología de Los Climas de México (Medina et al., 1998) y la del índice de aridez de De Martone (1926).

3.4.1. ÍNDICE DE ARIDEZ DEL PROGRAMA DEL MEDIO AMBIENTE DE LAS NACIONES UNIDAS

Esta clasificación se basa en la relación de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP). Los valores obtenidos se clasifican de acuerdo a los rangos de valores presentados en el Cuadro 3.1. En el caso de México, se definió como criterio de cálculo para la ETP, el de Thornthwaite, usando niveles mensuales de precipitación y temperatura, para el cálculo final. La razón anterior se basa en la disponibilidad de obtener valores de precipitación y temperatura de la mayor parte de México, ya que son los únicos datos requeridos.

En este sentido, existen varios métodos que determinan el cálculo de evapotranspiración, considerando en términos generales el de Penman como uno de los más completos, pero impráctico en su aplicación por la cantidad de datos que requiere. Otro método es el del tanque evaporímetro, que tiene el inconveniente de requerir un adecuado mantenimiento y toma de lecturas, así como de sujetarse a coeficientes “gruesos” que están en función de la vegetación sin considerar el tipo de suelo existente, lo que al igual que el método de Penman lo hace impráctico en su aplicación.

Cuadro 3.1. Clasificación climática de acuerdo a la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial.

Clima	Precipitación/ETP
Hiperárido	<0.05
Árido	0.05-0.20
Semiárido	0.21-0.50
Subhúmedo seco	0.51-0.65
Subhúmedo	0.65-1.00
Húmedo	>1.00

Otro método para el cálculo de evapotranspiración es el de Thornthwaite, que es uno de los mejores en balancear la simplicidad de datos meteorológicos requeridos (solamente precipitación y temperatura), con la veracidad del cálculo obtenido.

A partir de la temperatura se obtiene un índice de calor, el cual asume a través de coeficientes, la cantidad mensual de agua requerida por las plantas de un sitio. Posteriormente, esta cantidad mensual es modificada por la latitud del sitio, obteniéndose la evapotranspiración potencial del lugar.

Los pasos para obtener la ETP son los siguientes:

1) Se calcula un índice de calor mensual (i) a partir de la temperatura media mensual (t):

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

2) Se calcula el índice de calor anual (I) sumando los 12 valores de i :

$$I = \sum i$$

3) Se calcula la ETP mensual “sin corregir” mediante la fórmula:

$$ETP_{\text{sin corregir}} = 16 \left(\frac{10t}{i} \right)^a$$

Donde:

$ETP_{\text{sin corregir}}$ = ETP mensual en mm / mes para meses de 30 días y 12 horas de sol.

t = Temperatura media mensual, °C

I = Índice de calor anual

$$a = 675 * 10^{-9} I^3 - 771 * 10^{-7} I^2 + 1792 * 10^{-5} I + 0.49239$$

4) Se corrige para el número de días del mes y número de horas sol:

$$ETP = ETP_{\text{sin corregir}} \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

Donde:

ETP = Evapotranspiración potencial corregida

N = Número máximo de horas sol, dependiendo del mes y de la latitud

d = Número de días del mes

Finalmente se calcula el índice de aridez

$$\text{Índice de aridez} = P \text{ precipitación} / ETP$$

3.4.2. LOS CLIMAS DE MÉXICO

Para realizar esta clasificación, Medina *et al.* (1998), se basaron en tres niveles de estratificación; el primer nivel constituye una adaptación del método FAO destinada a identificar la presencia de regiones tropicales, subtropicales y templadas (FAO, 1981). En este primer nivel de estratificación, se valora la intensidad de los inviernos a través de los niveles de temperatura del mes más frío. A diferencia del método FAO, las temperaturas mensuales utilizadas no se corrigieron a nivel del mar, por lo que no sólo se considera el efecto de la latitud sobre la temperatura, sino también el de la altitud. Las categorías que se incluyen se describen en el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Estratificación de ambientes de acuerdo a temperatura del mes más frío.

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C	AMBIENTE
Todos los meses con temperatura mayor de 18 °C	Trópico
Por lo menos un mes con temperatura menor de 18 °C y mayor de 5 °C	Subtrópico
Por lo menos un mes con temperatura menor de 5 °C	Templado

El término trópico se refiere a regiones en las que no existe un período definido con temperaturas iguales o inferiores al punto de congelamiento, es decir el período libre de heladas se extiende a todo el año, por lo que la vegetación cultivada y no cultivada puede lograrse prácticamente en cualquier época del año, esto por supuesto, sólo en cuanto al factor temperatura. El término subtropical, representa áreas en las que existe un período de enfriamiento, que por lo general incluye uno o varios días con helada (temperatura < 0°C). En cuanto al término templado, éste corresponde a áreas, donde al igual que las regiones subtropicales, se presenta un período de enfriamiento, el cual incluye la ocurrencia de heladas que pueden llegar a tener una mayor intensidad que en el caso de las regiones subtropicales.

En el segundo nivel de estratificación se valora el aspecto disponibilidad de humedad a través del concepto de mes húmedo, que de acuerdo con Troll (1965) implica un período mensual durante el cual la precipitación acumulada es igual o superior a la ETP. Las categorías que se consideraron se describe el Cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Estratificación de ambientes de acuerdo a la disponibilidad de humedad.

PRECIPITACIÓN >= ETP	AMBIENTE
Ningún mes	Árido
1 a 3 meses	Semiárido
4 a 6 meses	Subhúmedo
Más de 6 meses	Húmedo

El término árido implica una baja disponibilidad de humedad del suelo, tan baja que no puede soportar prácticamente ningún tipo de vegetación cultivada en términos de que ésta sea rentable. La denominación de árido se otorga al sitio o región en que no se presenta ningún período consecutivo superior a 30 días con disponibilidad de humedad en el suelo. Esto significa que podrá haber zonas en las que ocurran períodos intermitentes húmedos que aparentemente podrían sustentar agricultura, pero que realmente resultan en una estación de crecimiento raquífica.

La presencia de estos períodos intermitentes de humedad y suelos con alta capacidad de almacenamiento de humedad, podrían permitir tal vez el desarrollo adecuado de cultivos, aunque esto por lo general sólo se garantiza para las primeras etapas del ciclo vegetativo, por lo que al final de cuentas ni aún la ocurrencia de estas dos condiciones favorables permite designar a estas áreas como potenciales para la agricultura de temporal.

La categoría de semiárido corresponde a ambientes en los que se dispone de 1 a 3 meses con humedad adecuada para el desarrollo de cultivos. Por esta razón, los ambientes semiáridos normalmente resultan apropiados para especies de ciclo vegetativo breve o que sin llegar al final de su ciclo, ofrezcan órganos productivos antes de finalizado dicho período. Si se cuantifica en términos de días, el estrato semiárido se ubica entre los 30 y 119 días húmedos.

El término subhúmedo, acotado de 4 a 6 meses húmedos, determina un ambiente en el que la agricultura temporalera es muy factible, teniendo cabida cultivares de diverso nivel de precocidad. En términos de días la categoría de subhúmedo se obtiene cuando el período húmedo oscila entre 120 y 209 días.

En cuanto al término húmedo, que significa 7 o más meses húmedos, representa disponibilidad de humedad en la mayor parte del año, por lo que es muy factible el logro de más de una cosecha al año. Aun cuando el esquema general de estratificación se trabaja bajo un contexto anualizado, se ha decidido definir húmedo al ambiente que cuente con 7 meses húmedos en adelante, ya que se considera que un ambiente con más de 210 días húmedos es por lo general capaz de extender esa humedad a casi todo el año, a través de balances hídricos de suelo favorables. Esto supone obviamente la disponibilidad de condiciones edáficas también favorables, como suelos profundos, de alta capacidad de almacenamiento de humedad. Un ambiente así, se supone hace posible la presencia de vegetación no cultivada durante todo el año y la consecución de dos o más cosechas al año de cultivos de ciclo anual.

El tercer nivel de estratificación tiene como objetivo valorar la intensidad anual de la temperatura. Este parámetro se utiliza para definir que tan cálidas o que tan frías son las regiones tropicales, subtropicales o templadas que se obtienen en el primer nivel de estratificación. Las categorías que se contemplan en este nivel de estratificación, fueron adaptadas de los criterios propuestos por García (1988) y FAO (1981) y son las que se describen en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Estratificación de ambientes de acuerdo a la temperatura anual.

TEMPERATURA MEDIA ANUAL °C	AMBIENTE
< 5	Frío
5 – 18	Templado
18 – 22	Semicálido
22 – 26	Cálido
> 26	Muy cálido

El término muy cálido representa condiciones calurosas durante todo el año. En cambio, el término cálido puede significar condiciones calurosas ya sea durante todo el año o durante un período del año, que puede ser de duración variable. No existe un invierno definido en ambas categorías térmicas.

La categoría de semicálido representa condiciones que en muchas ocasiones se describen como templadas. Los ambientes semicálidos se relacionan con áreas que presentan un invierno más o menos bien definido, aunque no por ello riguroso. Normalmente presentan algunos días con helada, en donde la temperatura no desciende muy por debajo de 0°C.

El término templado está relacionado con condiciones que en México normalmente se conocen como regiones frías, con un invierno bien definido y heladas que pueden llegar a ser severas, considerablemente por debajo de 0°C. Por último, la categoría de frío, representa ambientes con un alto nivel de enfriamiento, por lo que limita la presencia de vegetación tanto cultivada como no cultivada. Heladas muy severas se puede esperar que sean comunes.

Realizando la combinación de las categorías de los tres niveles de estratificación, es posible obtener un máximo de 60 ambientes, aunque en términos prácticos para las condiciones de la República Mexicana, se esperarían aproximadamente 48 estratos, excluyendo sobre todo a los climas fríos.

Para la estratificación de los ambientes se procede generando los siguientes parámetros y posteriormente se clasifican de acuerdo a lo anteriormente descrito.

TM = Temperatura promedio mensual

TA = Temperatura promedio anual

E = Eevaporación promedio mensual

P = P recipitación promedio mensual

ETP = Evapotranspiración potencial promedio anual (ETP = 0.8E)

MH = Número de meses húmedos (P >= ETP)

3.4.3. ÍNDICE DE ARIDEZ DE DE MARTONE

De Martonne (1926) desarrolló un índice de aridez basado en precipitación y temperatura a manera de balance hídrico, con el cual estratificó los tipos de vegetación. Este índice ha tenido utilidad entre otras cosas, para la delimitación de zonas áridas, tal es el caso de los trabajos de Schmidt (1991), quien utilizó el índice de De Martonne para delimitar los desiertos de Chihuahua y Sonora.

El índice de aridez es obtenido mediante la formula:

$$\text{Índice de aridez} = \frac{P}{T + 10}$$

Donde:

P = *Precipitación anual en mm*

T = *Temperatura media anual en °C*

De acuerdo al índice de aridez de De Martonne pueden ser identificados diferentes tipos de clima (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Clasificación climática de acuerdo al índice de aridez de De Martonne

Clima	Índice de aridez
Árido	0-10
Semiárido	10-20
Subhúmedo	20-30
Húmedo	30-60
Muy húmedo	> 60

3.4.4. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio fue la República Mexicana, la cual está ubicada en el Hemisferio Norte, entre los paralelos 14° 33' y 32° 44' Norte y entre los meridianos 85° 44' y 117° 07' Oeste (INEGI, 1992). Colinda al Norte con Los Estados Unidos de Norteamérica, al Sureste con Guatemala y Belice, al Sur y Oeste con el Océano Pacífico y al Este con el Golfo de México y Mar de las Antillas. Una parte del país (porción Sur) se localiza en la zona intertropical y la otra (porción Norte) en la zona subtropical, debido a que el Trópico de Cáncer cruza a la República en su parte media.

3.4.5. GENERACIÓN DE IMÁGENES

Se utilizó información climatológica a nivel mensual de las estaciones meteorológicas correspondientes a la Red de Estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Las estaciones fueron seleccionadas en base a su serie climática mayor de 20 años y a un proceso de depuración y verificación de la calidad de los datos. Finalmente se seleccionaron 1695 estaciones (Figura 3.1).

Las variables utilizadas fueron temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación y evaporación.

En este estudio se utilizó como herramienta de análisis los Sistemas de Información Geográfica (SIG); estos sistemas trabajan con vectores o con imágenes raster, que son matrices de valores. De tal manera que se generaron imágenes raster a partir de los archivos de datos de clima.

Las imágenes generadas tomaron como base la imagen del Modelo de Elevación Digital (MED) del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), el cual es una matriz de valores de altitud cada 30 segundos aproximadamente cada 900 metros, para todo México.

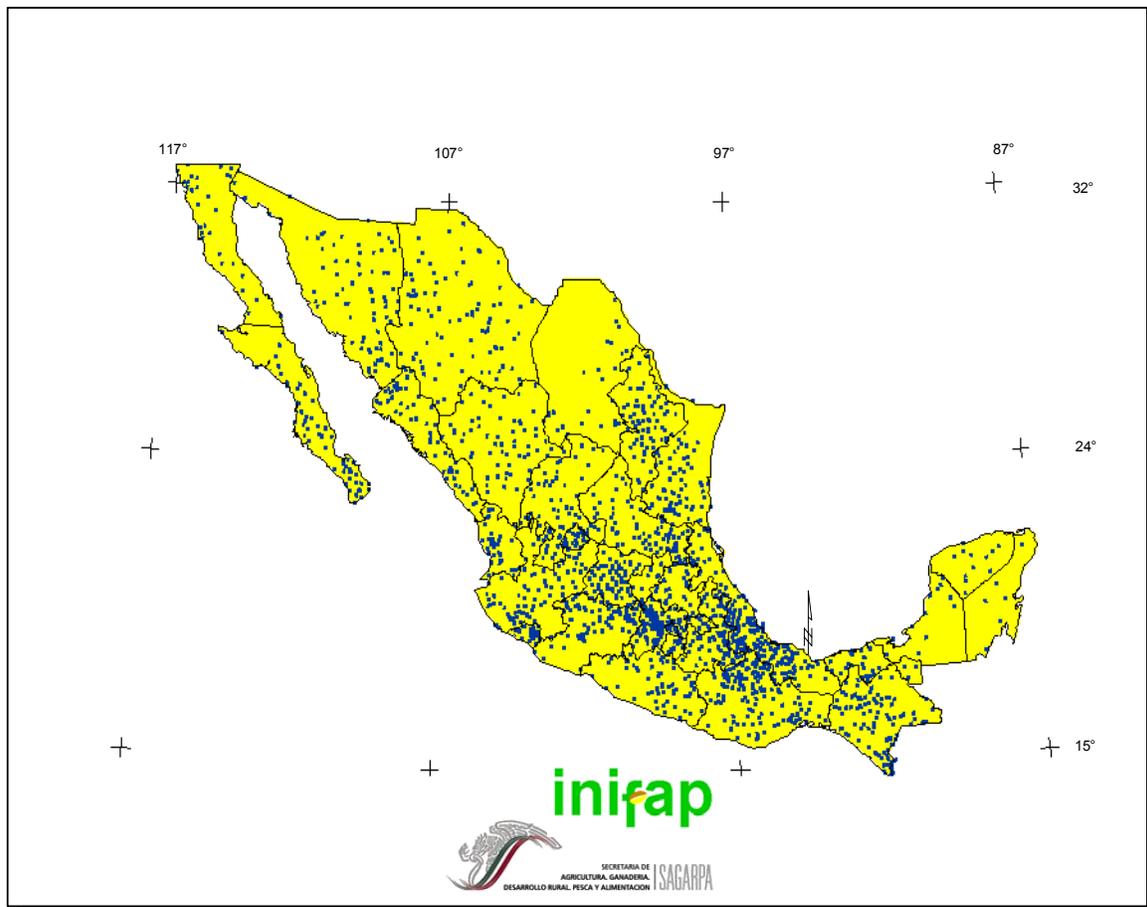


Figura 3.1. Distribución de las estaciones climatológicas incluidas en el estudio.

La información de las estaciones se interpoló para generar matrices con valores cada 900 m. El modelo de interpolación utilizado fue el inverso de la distancia al cuadrado, tomando los valores de las cinco estaciones más cercanas a cada punto de interpolación, estimando un promedio ponderado y ajustado por el

valor de altitud del punto, en el caso de temperatura. Se generaron 12 imágenes (una por cada mes) de estas cuatro variables y se importaron en el SIG IDRISI (Eastman, 1997) para manejarlas como imágenes raster.

Con las imágenes de las normales mensuales de temperatura máxima y mínima, precipitación y evaporación se obtuvieron con IDRISI las imágenes de los parámetros utilizados en este trabajo, los cuales corresponden a los requerimientos de cada una de las tres metodologías presentadas.

3.5. RESULTADOS

3.5.1. ÍNDICE DE ARIDEZ DEL PROGRAMA DEL MEDIO AMBIENTE DE LAS NACIONES UNIDAS

Los resultados presentados en este apartado se desarrollaron siguiendo los criterios de la Convención Mundial de Lucha Contra la Sequía y la Desertificación (CMLSD), la cual realizó una reunión con el objetivo de uniformizar a nivel mundial la cartografía y definición de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas. Para ello se adoptó la metodología propuesta por UNEP en 1991, la cual a su vez se basa en el índice de aridez, metodología desarrollada por Thornthwaite (1941) y adoptada para la elaboración del Atlas Mundial de la Desertización, publicado por el PNUMA

En la Figura 3.2 se presenta el mapa resultante y en la Tabla 5 se presentan las superficies de cada uno de los ambientes. En esa Figura se observa que las zonas hiperáridas y áridas se encuentran principalmente en los estados de Baja California, Baja California Sur, Coahuila y Sonora, las cuales representan 14,469,215 hectáreas. Las zonas semiáridas se encuentran en 62,820,434 hectáreas, que representan el 32.38% de la República Mexicana, distribuidas principalmente en los estados del Altiplano Mexicano y Desierto Sonorense. Respecto al clima Subhúmedo Seco, éste representa un porcentaje del 13.14. Estos cuatro ambientes suman en su conjunto 102,777,870 hectáreas, que representan casi el 53% de la República Mexicana (Cuadro 3.6).

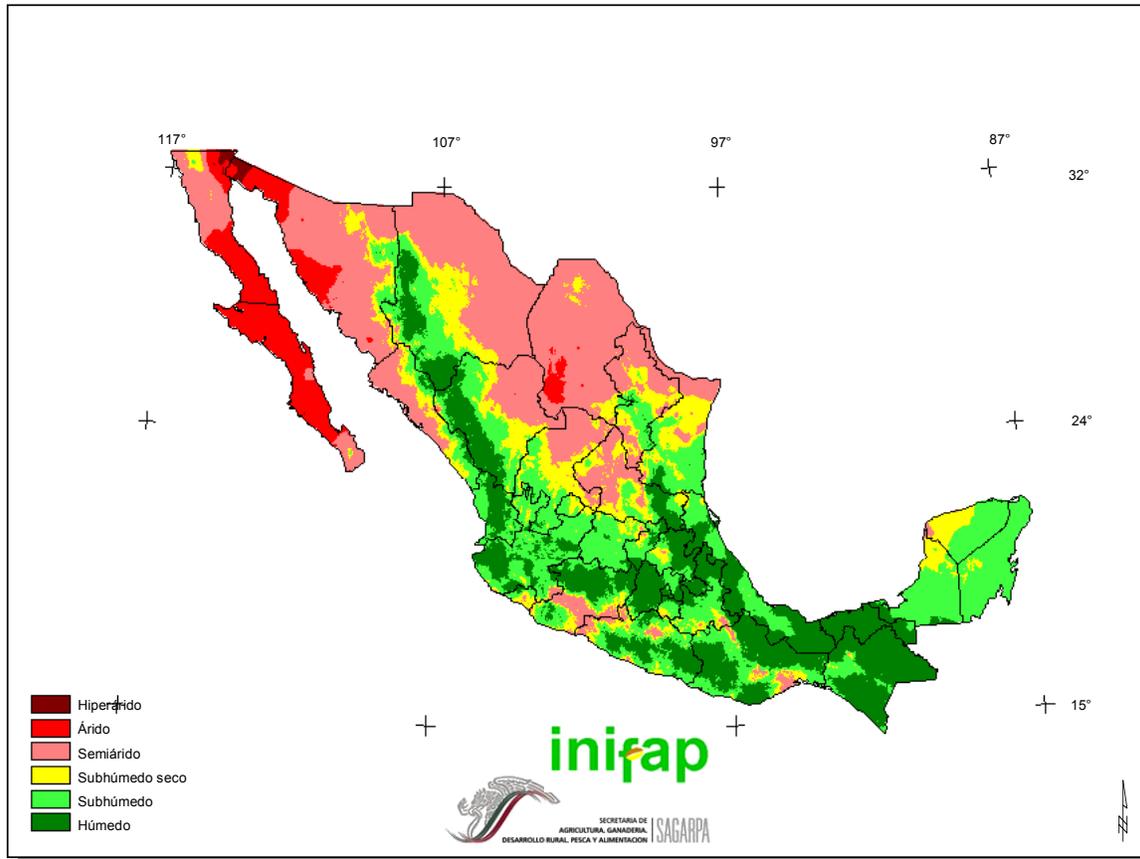


Figura 3.2. Ambientes áridos y semiáridos de la República Mexicana de acuerdo al Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 1992).

Cuadro 3.6. Número de hectáreas y porcentaje de los ambientes áridos y semiáridos subtropicales y templados (Pnuma, 1992).

AMBIENTE	HECTÁREAS	%
Hiperárido	704,165	0.36
Árido	13,765,050	7.09
Semiárido	62,820,434	32.38
Subhúmedo seco	25,488,221	13.14
Subhúmedo	50,505,755	26.03
Húmedo	40,734,649	21.00
TOTAL	194,018,274	100.00

En general, los climas que se denominan como áridos, son aquellos que no presentan de manera natural un período significativo de humedad para un uso agrícola o pecuario, aunque bajo riego estos climas pueden ser modificados.

Para el caso de las áreas semiáridas, éstas son zonas con períodos de humedad cortos, sujetas a variaciones climáticas acentuadas que repercuten en un aprovechamiento principalmente pecuario y silvícola de especies no maderables.

Las zonas subhúmedas secas son las que abarcan una gran cantidad de condiciones físicas, caracterizadas normalmente por un período de humedad bien definido que hace posible en la mayoría de los casos una agricultura de temporal, sin embargo, dependiendo de los cultivos son necesarios riegos de auxilio o de punta que permitan asegurar una cosecha.

Finalmente las áreas subhúmedas húmedas y húmedas tienen un período húmedo más prolongado durante el año, que permite una temporada de lluvias más estable, aunque no necesariamente indica la inexistencia de un período seco o problemas de desertificación o degradación del suelo.

En general se puede aseverar que esta metodología da una idea general adecuada, de los diferentes climas existentes en la República Mexicana, aunque disfraza ciertas áreas que con otras metodologías pudiesen ser consideradas más secas, a pesar de lo anterior es un excelente comparativo a nivel mundial con otras zonas del planeta.

Por otra parte, la simplicidad y sencillez de sus categorías de humedad, que es una de sus principales ventajas para su uso a nivel mundial, es un inconveniente en trabajos más finos a niveles nacionales y locales.

3.5.2. LOS CLIMAS DE MÉXICO

Los autores de esta clasificación consideraron tres niveles de estratificación; el segundo de ellos se refiere al nivel de humedad disponible. Tomando en cuenta únicamente este nivel, los resultados se presentan en la Figura 3.3. En dicha Figura es evidente la predominancia de ambientes áridos y semiáridos en el país y la relativamente escasa condición húmeda. De acuerdo a este nivel de estratificación, el 44.14% y el 22.02% del territorio nacional corresponden a ambientes áridos y semiáridos respectivamente (Cuadro 3. 7).

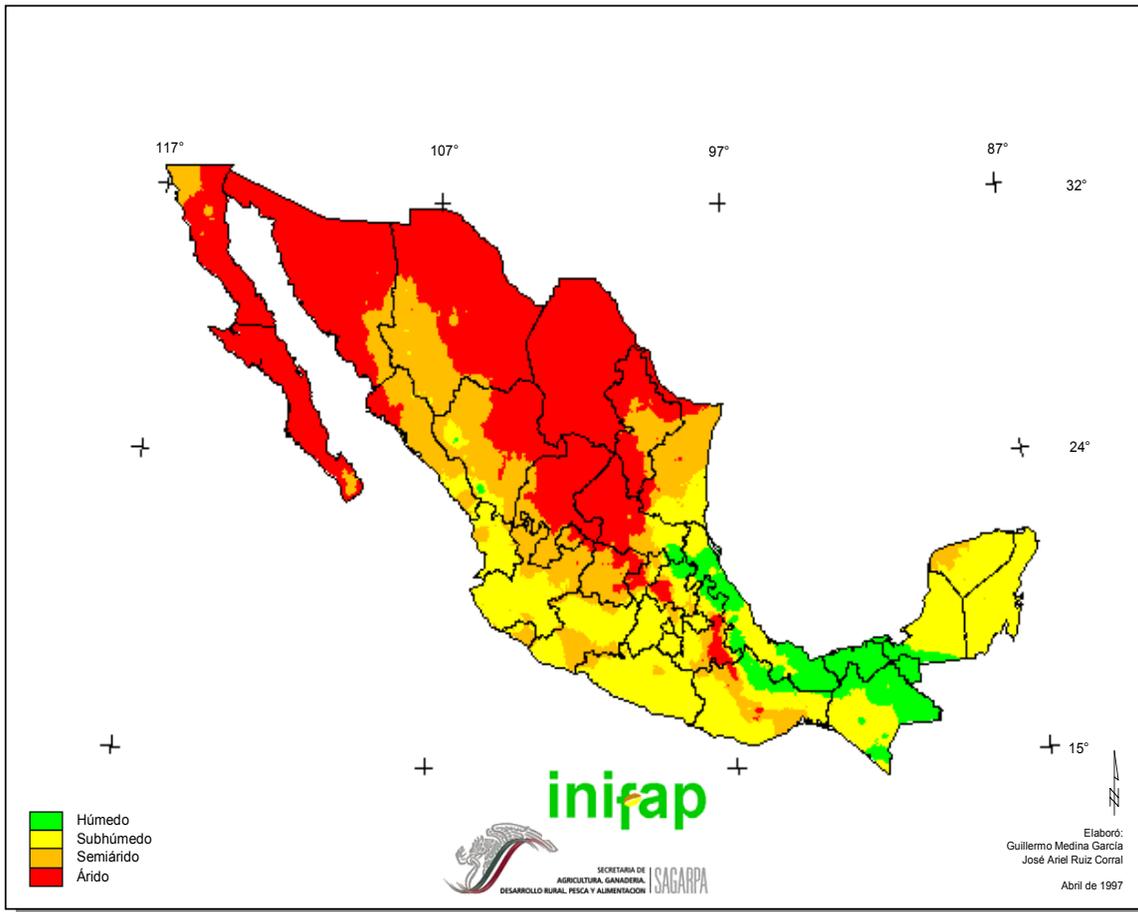


Figura 3.3 Estratificación de ambientes de la República Mexicana de acuerdo a disponibilidad de humedad. (Medina et al., 1998).

Cuadro 3.7. Número de hectáreas y porcentaje de acuerdo a disponibilidad de humedad (Medina et al., 1998).

AMBIENTE	HECTÁREAS	%
Árido	85,635,256	44.14
Semiárido	42,718,196	22.02
Subhúmedo	51,322,144	26.45
Húmedo	14,346,967	7.39
TOTAL	194,022,563	100.00

El ambiente húmedo se encuentra distribuido en el sureste de la República Mexicana, principalmente en los estados de Tabasco, Veracruz, Oaxaca y Chiapas. El subhúmedo también se encuentra en ese rumbo del país, en lo que es la península de Yucatán, el Golfo de México y el sur de las costas del Océano Pacífico, desde Nayarit hasta Chiapas. Los ambientes áridos y semiáridos se encuentran distribuidos en lo que es el centro y el norte del país.

La integración de los tres niveles de estratificación dio como resultado los ambientes mostrados en la Figura 3.4. En esa Figura se observan los 28 ambientes resultantes de los 60 posibles. En el Cuadro 3.8 se presenta el número de hectáreas y el porcentaje de cada uno de los ambientes. Ahí se observa que tres son los ambientes dominantes: trópico subhúmedo cálido, subtropical árido semicálido y subtropical árido templado; estos tres ambientes cubren un 51.93% de la superficie total del país.

Como se observa en la Figura 3.4, los ambientes resultantes de la integración de los tres niveles de estratificación son más detallados, así en el caso del ambiente subtropical árido, en esta integración de los tres niveles se clasifica como subtropical árido cálido que se encuentra en los estados de Tamaulipas, Nuevo León y Sonora, principalmente; subtropical árido semicálido, que se encuentra básicamente en los estados de Nuevo León, Coahuila, Chihuahua, Durango, Sonora y la península de Baja California; mientras que el subtropical árido templado se distribuye esencialmente en los estados de Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, San Luis Potosí y Nuevo León.

Esta subdivisión del ambiente subtropical árido en subtropical árido cálido, semicálido y templado, hace la diferencia para que en el ambiente subtropical árido templado se haga agricultura de temporal, mientras que en el subtropical árido semicálido y subtropical árido semicálido prácticamente no se realiza agricultura de temporal.

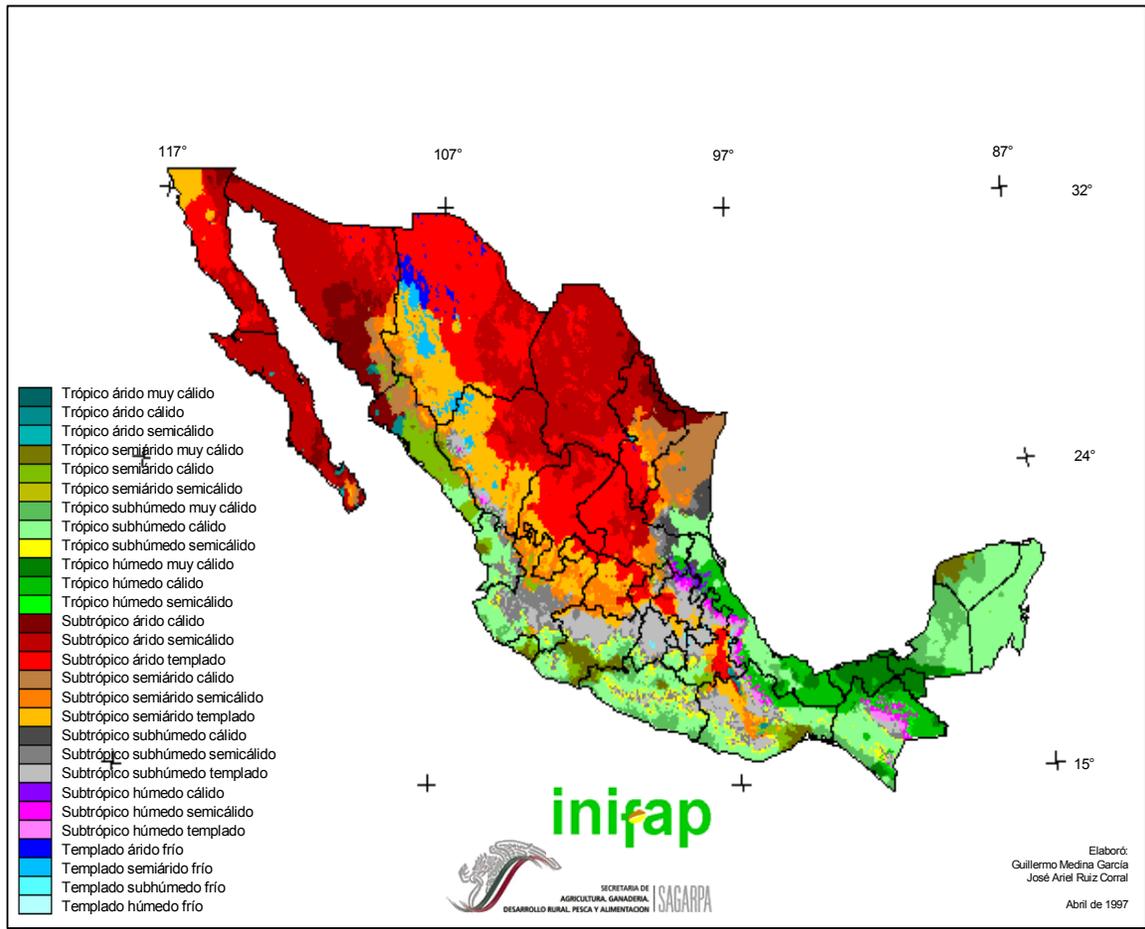


Figura 3.4. Estratificación ambiental de la República Mexicana. (Medina et al., 1998).

Los ambientes subtropicales semiáridos se encuentran principalmente en parte de la Sierra Madre Occidental en los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Jalisco y Guanajuato, por otro lado en parte de los estados de Tamaulipas y Nuevo León. Los subtropicales subhúmedos se encuentran básicamente en lo que es el eje neovolcánico que incluye los estados de Jalisco, Michoacán, México, Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Oaxaca. Los subtropicales húmedos se encuentra fundamentalmente en la Sierra Madre Oriental entre los estados de Veracruz con Hidalgo, Puebla y Oaxaca y, en el estado de Chiapas.

Cuadro 3.8. Número de hectáreas y porcentaje de los ambientes de acuerdo a los tres niveles de estratificación (Medina et al., 1998).

AMBIENTE	HECTÁREAS	%
Trópico árido muy cálido	36,193	0.02
Trópico árido cálido	613,401	0.32
Trópico árido semicálido	75,013	0.04
Trópico semiárido muy cálido	2,904,586	1.50
Trópico semiárido cálido	4,873,149	2.51
Trópico semiárido semicálido	242,192	0.12
Trópico subhúmedo muy cálido	6,713,845	3.46
Trópico subhúmedo cálido	25,160,772	12.97
Trópico subhúmedo semicálido	2,565,386	1.32
Trópico húmedo muy cálido	4,172,342	2.15
Trópico húmedo cálido	7,170,818	3.70
Trópico húmedo semicálido	501,784	0.26
Subtrópico árido cálido	8,280,915	4.27
Subtrópico árido semicálido	43,166,072	22.25
Subtrópico árido templado	32,418,750	16.71
Subtrópico semiárido cálido	6,674,451	3.44
Subtrópico semiárido semicálido	8,801,904	4.54
Subtrópico semiárido templado	17,468,062	9.00
Subtrópico subhúmedo cálido	1,455,125	0.75
Subtrópico subhúmedo semicálido	6,270,496	3.23
Subtrópico subhúmedo templado	8,969,904	4.62
Subtrópico húmedo cálido	503,426	0.26
Subtrópico húmedo semicálido	1,204,397	0.62
Subtrópico húmedo templado	793,055	0.41
Templado árido frío	1,044,932	0.54
Templado semiárido frío	1,753,864	0.90
Templado subhúmedo frío	186,958	0.10
Templado húmedo frío	2,955	0.00
TOTAL	194,024,747	100.00

Del total de los ambientes resultantes de esta clasificación, en la Figura 5 se presentan únicamente los áridos y semiáridos más importantes en el país. La superficie que representa cada uno de ellos se presenta en el Cuadro 3.9. Estos ambientes suman un total de 119,608,950 ha, que representan un 61.65% del territorio nacional en comparación con el 53% de la clasificación del PNUMA. En cambio, si se toman en cuenta sólo los ambientes subtrópico árido cálido, subtrópico árido semicálido, subtrópico árido templado, subtrópico semiárido cálido y el subtrópico semiárido templado, éstos representan el 55.67% del total de la superficie nacional y las zonas de distribución se asemejan a las presentadas en la clasificación del PNUMA.

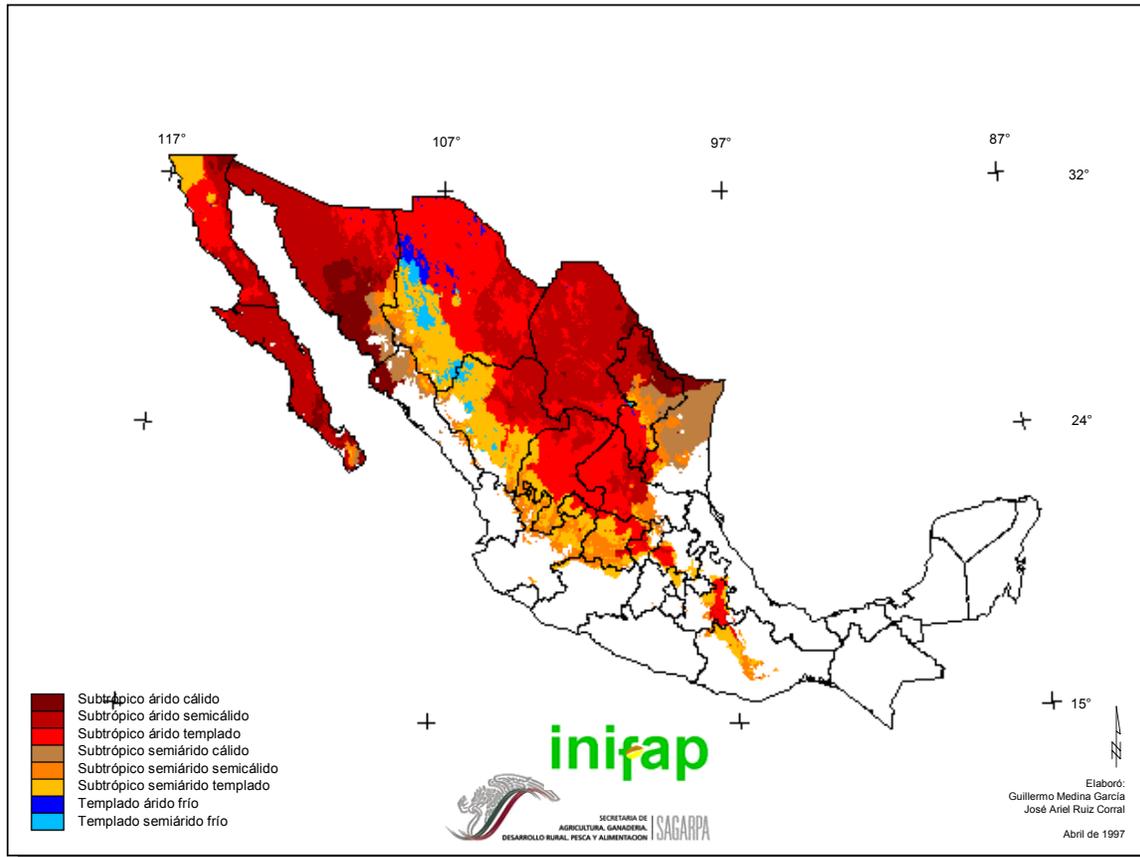


Figura 3.5. Principales ambientes áridos y semiáridos de la República Mexicana. (Medina et al., 1998).

Cuadro 3.9. Número de hectáreas y porcentaje de los ambientes áridos y semiáridos subtropicales y templados (Medina et al., 1998).

AMBIENTE	HECTÁREAS	%
Subtrópico árido cálido	8,280,915	4.27
Subtrópico árido semicálido	43,166,072	22.25
Subtrópico árido templado	32,418,750	16.71
Subtrópico semiárido cálido	6,674,451	3.44
Subtrópico semiárido semicálido	8,801,904	4.54
Subtrópico semiárido templado	17,468,062	9.00
Templado árido frío	1,044,932	0.54
Templado semiárido frío	1,753,864	0.90
TOTAL	119,608,950	61.65

3.5.3. ÍNDICE DE ARIDEZ DE MARTONE

En la Figura 3.6 se presenta el mapa resultante y en el Cuadro 3.10 se presentan las superficies de cada uno de los ambientes. En esa Figura se observa que las zonas áridas se encuentran principalmente en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Coahuila, Durango y Chihuahua, las cuales representan 28,031,276 hectáreas. Las zonas semiáridas se encuentran en 61,935,776 hectáreas, que representan el 31.92% de la República Mexicana, distribuidas principalmente en los estados del Altiplano Mexicano y Desierto Sonorense. Respecto al clima subhúmedo, el cual también es un clima seco, éste representa un porcentaje del 22.13. Estos cuatro ambientes suman en su conjunto 132,899,927 hectáreas, que representan 68.5% de la República Mexicana (Cuadro 3.10).

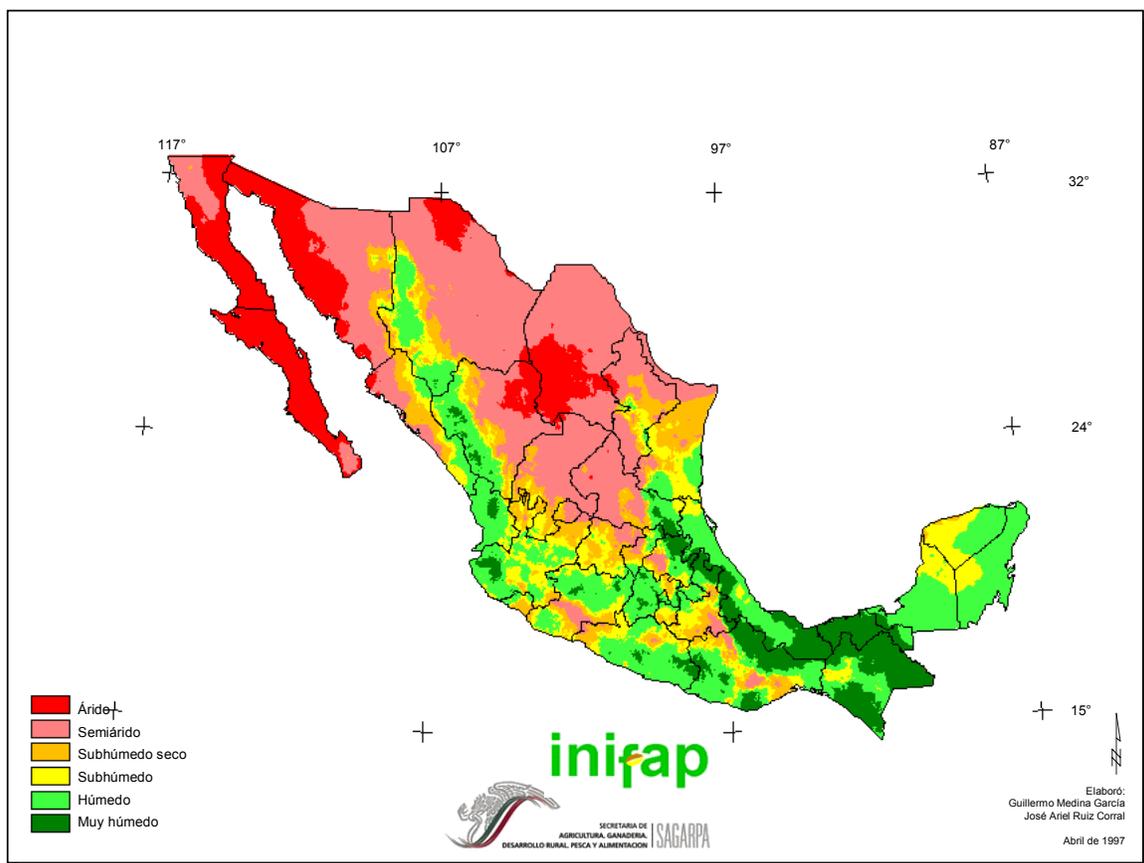


Figura 3.6. Índice de aridez de la República Mexicana (De Martone, 1926).

En general, los climas que se denominan como áridos, son aquellos que no presentan de manera natural un período significativo de humedad para un uso agrícola o pecuario. Para el caso de las áreas semiáridas estas son zonas con períodos de humedad cortos, sujetas a variaciones climáticas acentuadas que repercuten en un aprovechamiento principalmente pecuario y silvícola de especies no maderables.

Las zonas subhúmedas secas son las que abarcan una gran cantidad de condiciones físicas, caracterizadas normalmente por un período de humedad bien definido que hace posible en la mayoría de los casos una agricultura de temporal, aunque dependiendo de los cultivos, son necesarios riegos de auxilio o de punta que permitan asegurar una cosecha.

Las áreas húmedas y muy húmedas tienen un periodo húmedo más prolongado durante el año, que permite una temporada de lluvias más estable, aunque no necesariamente indica la inexistencia de un período seco o problemas de desertificación o degradación del suelo.

En general se puede aseverar que esta metodología da una idea general adecuada, de los diferentes climas existentes en la República Mexicana, aunque disfraza ciertas áreas que son clasificadas como subhúmedas y que sin embargo pudieran ser consideradas como semiáridas.

La sencillez de su metodología para la obtención de las categorías de humedad, es una de sus principales ventajas para su uso, aunque es un inconveniente en trabajos más detallados.

Cuadro 3.10. Número de hectáreas y porcentaje de los ambientes áridos y semiáridos (De Martone, 1926).

AMBIENTE	HECTÁREAS	%
Árido	28,031,276	14.45
Semiárido	61,935,776	31.92
Subhúmedo seco	20,751,285	10.70
Subhúmedo	22,181,590	11.43
Húmedo	43,942,262	22.65
Muy húmedo	17,176,086	8.85
TOTAL	194,020,533	100.0

3.5.4. COMPARACIÓN DE LOS ÍNDICES DE ARIDEZ

Generalmente se elabora una clasificación para resolver algún problema específico, como por ejemplo, el estudio de las interrelaciones entre el clima y la vegetación, por lo que resulta imposible lograr una clasificación completamente satisfactoria para todo tipo de aplicaciones. Cualquier sistema que se elabore, debe tener una aplicación fácil, basarse en principios meteorológicos, reunir datos prácticos y fáciles de manejar, limitarlos y dirigirlos a objetivos bien definidos (Griffiths, 1985).

No obstante que en este caso las tres clasificaciones tienen como objetivo ubicar y cuantificar los ambientes áridos y semiáridos, existen diferencias entre la clasificación de los tres autores (Cuadro 3.11). En esa tabla se presentan las superficies de acuerdo a cada metodología, únicamente de los ambientes con mayor problema o que son mayormente afectados por la sequía.

Cuadro 3.11. Superficies estimadas por diferentes métodos

AMBIENTE	PNUMA, 1992		Medina et al., 1998		De Martone, 1926	
	Ha	%	Ha	%	ha	%
Árido	14,469,215	7.45	85,635,256	44.14	28,031,276	14.45
Semiárido	62,820,434	32.38	42,718,196	22.02	61,935,776	31.92
Subhúmedo o seco	25,488,221	13.14			20,751,285	10.70
TOTAL	102,777,870	52.97	128,353,452	66.16	110,720,595	57.07

En el caso del índice de aridez del PNUMA, con fines de comparación se sumó el hiperárido y árido en el ambiente árido; en el caso de la clasificación de Medina y colaboradores, se está considerando el primer nivel de estratificación, el cual se refiere a disponibilidad de humedad.

En el Cuadro 3.11 se observa que en los tres casos la superficie con ambientes áridos, semiáridos y subhúmedos secos es mayor del 50% de la superficie total del país. También se aprecia que la clasificación de Medina y colaboradores (1998) difiere de las otras dos ya que reporta más del 44% de zonas áridas, esto se debe a que a diferencia de las otras dos donde simplemente se hace la clasificación considerando los diferentes rangos para cada ambiente, en esta última se hacen clasificaciones dentro de cada ambiente macro considerando la temperatura.

La clasificación de Medina, tiene un criterio más agronómico y se basa en el número de meses en que la ETP es mayor o igual a la precipitación; así, en el ambiente árido ningún mes cumple la condición anterior y en el ambiente semiárido se cumple de uno a tres meses. El término árido implica una baja disponibilidad de humedad del suelo, tan baja que no puede soportar prácticamente ningún tipo de vegetación cultivada en términos de que ésta sea rentable. La categoría de semiárido corresponde a ambientes en los que se dispone de 1 a 3 meses con humedad adecuada para el desarrollo de cultivos. Por esta razón, los ambientes semiáridos normalmente resultan apropiados para especies de ciclo vegetativo breve o que sin llegar al final de su ciclo, ofrezcan órganos productivos antes de finalizado dicho período. Si se cuantifica en términos de días, el estrato semiárido se ubica entre los 30 y 119 días húmedos.

En cuanto a las clasificaciones del PNUMA y De Martonne, la primera reporta menor superficie de ambiente árido que la segunda, el semiárido lo reportan de manera muy similar y en el subhúmedo seco reporta mayor superficie la primera de estas dos clasificaciones. Al respecto se puede comentar la clasificación de De Martonne ubica al ambiente subhúmedo seco de una mejor manera, ya que este se puede observar que se encuentra en parte de los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Zacatecas, Jalisco, Guanajuato, entre otros; mientras que la

clasificación del PNUMA clasifica buena parte de estas regiones como subhúmedas.

De manera general, se puede comentar que las tres clasificaciones hacen una buena ubicación de los ambientes áridos y semiáridos, aunque con algunas diferencias entre ellas. Como ejemplo, en clasificación del PNUMA los estados de Jalisco y Guanajuato, aparecen con ambientes subhúmedos y húmedos, sin embargo, se sabe que en el norte de estos estados las condiciones no son precisamente así. De aquí se puede decir que hace falta un estudio más detallado considerando los tipos de vegetación o imágenes de satélite que permitan establecer con mayor precisión los límites entre los diferentes ambientes.

Independientemente de la clasificación utilizada para ubicar y definir las zonas o ambientes áridos y semiáridos, se pueden indicar algunas sugerencias respecto al manejo o actividades más convenientes en cada uno de ellos.

En los ambientes áridos no presenta de manera natural un período significativo de humedad para un uso agrícola o pecuario, sin embargo bajo riego pueden ser modificados. Éstas son zonas cuyos habitantes rurales preferentemente deberán ser favorecidos con programas de tipo asistencial, o bien con proyectos productivos que resalten la flora y fauna del lugar.

Los ambientes semiáridos son zonas con períodos de humedad cortos, sujetas a variaciones climáticas acentuadas que repercuten en un aprovechamiento principalmente pecuario y silvícola de especies no maderables. Estos ecosistemas son muy frágiles, y si son degradados, su tiempo de recuperación es relativamente largo, por lo que el manejo de los agostaderos ubicados en estas zonas debe dar énfasis en evitar el sobrepastoreo y deterioro de la cubierta vegetal.

Los ambientes subhúmedos secos abarcan una gran cantidad de condiciones físicas, caracterizadas normalmente por un período de humedad bien definido que hace posible en la mayoría de los casos una agricultura de temporal. Sin embargo, dependiendo de los cultivos son necesarios riegos de auxilio o de punta que permitan asegurar una cosecha. En estas áreas es donde se debe impulsar la agricultura y ganadería locales, complementada con el aprovechamiento de especies no maderables, cuidando de no degradar los recursos naturales.

3.6. CONCLUSIONES

Las tres clasificaciones aquí presentadas ubican de manera general a los ambientes áridos y semiáridos, aunque existen algunas diferencias entre ellas.

Los ambientes áridos, semiáridos y subhúmedos secos representan más del 50% del territorio del país.

Se sugiere hacer un estudio más detallado considerando los tipos de vegetación o imágenes de satélite que permitan establecer con mayor precisión los límites entre los diferentes ambientes.

Para cada ambiente se deben definir acciones a implementar considerando los recursos ambientales existentes y su fragilidad, así como el manejo más adecuado ya sean actividades de tipo agrícola, pecuario o forestal (especies no maderables).

3.7. LITERATURA CITADA

Bhalme, H. N., and D. A. Mooley. 1980. Large-scale drought/floods and monsoon circulation. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 1197-1211.

Byun, H. R., and D. A. Wilhite. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate*, 12, 2747-2756.

Castorena, G., M. E. Sánchez, M. E. Florescano, R. G. Padilla, y U. L. Rodríguez, Análisis histórico de las sequías en México, México, Comisión del Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1980, 137 pp.

Critchfield, J. 1983. *General Climatology*. 310 p.

De Martonne, E. 1926. Une nouvelle fonction climatologique: L'Indice D'Aridite. *La Météorologie* 68:449-458.

Eastman, J.R. 1997. IDRISI: Technical reference. Clark Univ. Graduate Sch. of Geography. Worcester, Mass. USA. 229 p.

FAO. 1981. Informe del Proyecto de Zonas Agroecológicas. Vol. 3: Metodología y Resultados para América del Sur y Central. FAO 48/3. Roma. 143 p.

García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 4a. Ed. México, D.F. 219 p.

Gibbs, W. J. and J. V. Maher. 1967. Rainfall deciles as drought indicators. *Bureau of Meteorology Bull.* 48, Commonwealth of Australia, Melbourne, Australia.

Gommes, R. and F. Petrassi. 1994. Rainfall variability and drought in Sub-Saharan Africa since 1960. *Agro-meteorology series working paper 9*, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Griffiths, J. F. 1985. *Climatología aplicada*. 1a. Edición en Español. Publicaciones Cultural. México, D.F. 154 p.

INEGI. 1992. Carta geográfica de la República Mexicana. 5a. Dirección General de Geografía. 5a. Impresión INEGI. Aguascalientes, Ags.

Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Fenómenos meteorológicos. [En línea] 5 de enero de 2004. <<http://www.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/meteorologia.htm>> [Consulta: 4 de marzo de 2004].

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Anaheim, CA, Amer. Meteor. Soc., 187-190.

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, Ninth Conf. on Applied Climatology, Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 187-190.

Medina G., G., Ruiz C., J. A. y Martínez P., R.A. 1998. Los Climas de México: Una estratificación ambiental basada en el componente climático. Libro Técnico No. 1. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro. SAGAR-INIFAP 104 p.

NOAA Paleoclimatología. La sequía en América del Norte: Una paleoperspectiva. 28 de agosto de 2003. <http://wdc.cricyt.edu.ar/paleo/es/drought/drght_what.html> [Consulta: 10 de marzo de 2004]

Palmer, W. C. 1965. Meteorological drought. U.S. Weather Bureau Tech Paper 45, 1-58.

Palmer, W. C. 1968. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index. Weatherwise, 21, 156-161.

Ruiz, V. J. 1988. Sistemas de clasificación climática. Material de apoyo para curso de capacitación. Documento inédito. INIFAP-SAGAR.

Salati, E. y A. C. Nobre, "Possible climatic impacts of tropical deforestation", en Climatic Change, Vol. 19, 1991, pp. 177-196.

San Diego State University (SDSU), Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro del Sudoeste para la Investigación y Política Ambiental (CSIPA). Tres problemas de desarrollo sustentable en el Valle de Ojos Negros, Baja California, México. [En línea]. [Consulta: 15 de marzo de 2004], <http://tresproblemas.sdsu.edu/tres_problemas_portal.html> .

Shafer, B. A. and L. E. Dezman. 1982. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snow pack runoff areas. Proc. Western Snow Conf., 164-175.

Schmidt Jr., R. H. 1991. The arid zones of Mexico: climatic extremes and conceptualization of the Sonoran Desert. In: Memorias del V Congreso Nacional de Meteorología. Cd. Juárez, Chihuahua, Mexico. pp. 39-54.

Tannehill, O. R. 1947. La sequía, sus causas y efectos. Princeton University Press, 597 p.

Troll, C. 1965. Seasonal climates of the earth. In: World maps of climatology. E. Redenwalt and H. Jusats Editors.

Van Rooy, M. P. 1965. A rainfall anomaly index independent of time and space. *Notos*, 14, 43.

Villalpando, I. J. F. 1985. Metodologías de investigación en Agroclimatología. Documento de circulación interna mimeografiado. INIA-SARH. Zapopan, Jalisco. 183 p.

Weghorst, K. M. 1996. The reclamation drought index: Guidelines and practical applications. Bureau of Reclamation, Denver, CO, 6 pp. [Available from Bureau of Reclamation, D-8530, Box 25007, Lakewood, CO 80226.].

Williams, M. A. J., R.C. Balling Jr. 1996. Interactions of desertification and climate. WMO-UNEP. 1st. Edition Arnold. London. 270 p.

4. PROGRAMA SIG GESEZA Y EL SPI, PARA CARACTERIZAR LA SEQUÍA Y SU RELACIÓN CON SINIESTROS DE CULTIVOS DE TEMPORAL E INCENDIOS FORESTALES

Ing. Conrado Corvera Márquez
Estudiante del programa
Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos
Universidad Autónoma de Zacatecas
ccorveram@yahoo.com.mx

Dr. Francisco Mojarro Dávila
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Dr. Israel Velasco Velasco
Especialista en Hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Dr. Julián González Trinidad
Profesor-Investigador
Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos
Universidad Autónoma de Zacatecas

4. PROGRAMA SIG GESEZA Y EL SPI, PARA CARACTERIZAR LA SEQUÍA Y SU RELACIÓN CON SINIESTROS DE CULTIVOS DE TEMPORAL E INCENDIOS FORESTALES

Conrado Corvera Márquez
Francisco Mojarro Dávila
Israel Velasco Velasco
Julián González Trinidad

4.1. IMPORTANCIA DE LA SEQUIA

En México, como en todos los países, el agua constituye un elemento que determina en gran medida el buen funcionamiento de los sistemas de producción e influye, al mismo tiempo, en la calidad de vida de sus habitantes. Sin embargo, la disponibilidad de agua por habitante, tiende a una reducción notoria (Bali, 2001).

Uno de los factores que han influido en la escasez del agua en México, en otros países y en particular en Zacatecas es la sequía. Sin embargo, la vulnerabilidad de la sociedad a la sequía es afectada por el crecimiento y los cambios de la población, urbanización, las características demográficas, tecnología, las tendencias del uso del agua, política del gobierno, comportamiento social, y conocimiento ambiental, entre otros. Estos factores están cambiando continuamente y la vulnerabilidad de la sociedad a la sequía puede aumentar o disminuir en respuesta a estos cambios (NDMC, 2005).

Desde tiempos inmemoriales, la presencia de la sequía y la falta de agua han sido factores que han contribuido al desarrollo de la humanidad (Velasco, 2002). "Históricamente la sequía puede considerarse como un acontecimiento natural de enorme trascendencia, ya que por su causa se han visto diezmadas las poblaciones por hambrunas, se han impulsado movimientos migratorios masivos y provocado gravísimas crisis económicas, sociales y políticas" (Tierraamerica, 2003). Pero también la sequía ha sido frecuentemente el motor del desarrollo tecnológico, al impulsar, por necesidad, los avances científicos para mejorar la gestión del agua (Velasco, 2002).

Las sequías han promovido movilizaciones campesinas: en el Estado de México en 1935 los campesinos demandaron a las autoridades que se les proveyera de agua, pues no tenían para darle de beber a sus animales. En 1937 en varios poblados de Nuevo León los campesinos exigieron al ejecutivo la construcción de presas y lo mismo ocurrió en el año de 1938 en Coahuila. En 1956, en la Comarca Lagunera, los campesinos exigieron nuevamente al gobierno se hicieran inversiones con el fin de remediar la sequía que estaba afectando. En 1958, en Veracruz y San Luis Potosí, los campesinos pidieron a la Secretaria de Agricultura y Ganadería (SAG) que se provocaran lluvias artificiales (Castorena *et al.*, 1980).

En el estado de Zacatecas se tienen registros de que se ha presentado el fenómeno de la sequía por ejemplo en el periodo de 1872 a 1890 la sequía se presentó en dos años. En el periodo de 1890 al 1900 el fenómeno se presentó en dos años; en el lapso de 1900 a 1950 solo se presentó la sequía en 5 años los cuales no fueron consecutivos y en el periodo de 1950 a 1970 también se presentó el fenómeno de la sequía en dos años. Los efectos económicos y sociales fueron la mortandad del ganado debido a la escasez de pasto y carestía del maíz debido a que no se sembró (Castorena *et al.*, 1980).

Recientemente en la cuenca alta del río Juchipila se presentó un faltante de precipitación durante los años de 1998 al 2002, y los almacenamientos en las presas de el Chique y Tayahua del estado de Zacatecas fueron muy por debajo de la media, lo que ocasionó un enfrentamiento social entre lo usuarios de las dos presas (Mojarro *et al.*, 2004).

La sequía produce una compleja red de impactos que abarca a muchos sectores de la economía y va mucho más allá de lo que experimenta una sequía física. Esta complejidad existe porque el agua es básica para la sociedad para producir bienes y proveer servicios (Ponce *et al.*, 2004). Los efectos en las diferentes especies de ganado, varían. Los camellos son capaces de resistir condiciones adversas mejor que otros animales, mientras que el ganado vacuno resulta gravemente afectado (Stop Disasters, 1994).

Los impactos son comúnmente referidos como directos e indirectos. Los impactos directos incluyen baja productividad en los cultivos, ranchos y bosques; el incremento de peligro de incendios; reducidos niveles de agua, en presas y acuíferos e incremento en la mortalidad ganadera y vida silvestre (Ponce *et al.*, 2004).

El impacto de las sequías en la producción agropecuaria no debe desligarse de la crisis por la que atraviesa este sector, desde mediados de la década de los setentas, se trata de una crisis caracterizada por:

- El decaimiento del ritmo de producción agrícola, que afecta esencialmente a los productos básicos; maíz, frijol, trigo, etc.
- Un incremento notable en las importaciones de productos agrícolas y un decremento en las exportaciones.
- Un aumento constante en los precios de los productos agropecuarios.

Las repercusiones sociales están a la vista: movilizaciones campesinas, descontento en las ciudades por el incremento en los precios y el abatimiento de los niveles de vida de grandes extensiones de la población urbana, migración constante del campo a la ciudad, desempleo rural y desempleo urbano (Castorena *et al.*, 1980).

Por tales motivos es importante monitorear la sequía y programar planes para prevenirla y mitigarla cuando se presente el fenómeno. Por tal motivo en el presente trabajo se cubren los siguientes aspectos:

1. Estudiar en retrospectiva la ocurrencia histórica y espacial de sequía en el estado de Zacatecas mediante el uso del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI por sus siglas en ingles).
2. Aplicar el Sistema de Información Geográfica para la Gestión de la Sequía en el Estado de Zacatecas (SIG_GESEZA 1.0) para evaluar cuantitativamente la sequía como fenómeno y sus impactos en la agricultura de temporal y en los incendios forestales

4.2. ANTECEDENTES DE LA SEQUIA

La sequía es uno de los fenómenos naturales más complejos (CEISS, 2004), se origina de la deficiencia de la precipitación sobre un periodo de tiempo (NDMC, 2005), tiene un inicio lento, y demora meses o aún años en desarrollarse. Puede afectar una región grande, causando muy pocos daños estructurales (GIONBC, 2004).

La sequía es un fenómeno natural que ocurre cuando la precipitación y la disponibilidad del agua en un periodo de tiempo y una región dados, es menor que el promedio histórico registrado, y cuando esta deficiencia es lo suficientemente grande y prolongada como para dañar las actividades humanas (Velasco, 2002).

4.2.1 El Índice de la Precipitación Estandarizado (SPI)

McKee (1993) en la Universidad del Estado de Colorado desarrolló El Índice de Precipitación Estandarizado o SPI, por sus siglas en inglés ("Standardized Precipitation Index"), actualmente es uno de los índices más utilizado a nivel mundial para la evaluación y monitoreo de la sequía.

El SPI le permite a un analista determinar la anomalía de una sequía a una escala de tiempo dada (la resolución temporal) de interés para cualquier estación de lluvia con los datos históricos. También puede usarse para determinar períodos anómalos de humedad. **El SPI no es una herramienta de predicción de sequía** (McKee *et al.*, 1995).

El SPI fue diseñado para cuantificar el déficit de precipitación para múltiples escalas de tiempo. Estas escalas reflejan el impacto de la sequía sobre la disponibilidad del recurso agua. Las condiciones de humedad del suelo responden a anomalías en la precipitación sobre una escala relativamente corta, mientras que el agua contenida en la tierra, el flujo de corriente, y el almacenamiento de las presas reflejan las anomalías de precipitación a largo plazo. Por estas razones, el SPI fue originalmente calculado para períodos de tiempo de 3, 6, 12, 24 y 48 meses (McKee *et al.*, 1995). Por ejemplo, el SPI para tres meses calculado para enero de 2005 utiliza la precipitación total de noviembre de 2004 a enero de 2005. Así mismo, el SPI de 12 meses para enero de 2005 se utiliza la precipitación total

desde febrero de 2004 hasta enero de 2005, mientras que el SPI de 48 meses utiliza la precipitación total desde febrero de 2001 hasta enero de 2005.

Esto conlleva a disponer del índice a diferentes escalas de tiempo. La utilidad de ello es que el índice mensual no siempre resulta ilustrativo de las condiciones reales. En las áreas sin riego puede resultar más importante analizar el comportamiento de las lluvias en un periodo de tres meses. Por otro lado el comportamiento anual de la lluvia mediante este índice da mejor idea de cómo se reflejaría en los escurrimientos, y de especial interés en las áreas de riego (Velasco, 2002).

El National Drought Mitigation Center (NDMC, 2005) de Estados Unidos, está usando SPI para monitorear las condiciones de humedad. Los rasgos distintivos de este índice son que identifica sequías emergentes más pronto que el Índice de Palmer, y que se calcula en varias escalas de tiempo.

Velasco *et al.* (2004) utilizaron el SPI y el PDSI, por sus siglas en inglés (Palmer Drought Severity Index) aplicándolos en las cuencas Conchos y Pecos, para comparar su comportamiento, los dos muestran resultados similares que, en este caso de aplicación, indican la presencia recurrente y persistente de la sequía en dicha región.

Mojarro *et al.* (2004) usaron el SPI para caracterizar la sequía en la cuenca alta del río Juchipila. Se estimaron los SPI anuales para el periodo de 1979 al 2002. El año de 1990, resulto ser el año más húmedo del período de análisis y el año de 1999 el de máxima sequía, de hecho a nivel nacional es un año típico de sequía. El escurrimiento para el año 1999 fue de 34.11 hm³, una tercera parte del escurrimiento promedio histórico, lo cual no satisface los usos consuntivos de la infraestructura construida en la cuenca. Así mismo, se estimaron los valores anuales del SPI para 1999, con lo cual se pudo observar que en alrededor de dos terceras partes de la cuenca (norte, oeste y sur) se presentaron condiciones de sequía moderada, con valores del SPI entre -1 y -1.5. Al este de la cuenca se presentaron las condiciones más críticas de déficit de lluvia, en esta zona se presentó sequía severa y extremadamente severa, con valores del SPI entre -1.5 y -2.5. De acuerdo con estos análisis, concluyeron que el SPI es una herramienta valiosa para caracterizar la sequía en sistemas hidrológicos.

Giddings *et al.* (2005) trabajaron con el SPI para determinar las zonas de índice de precipitación estandarizado en México, obteniendo siete zonas empíricas mexicanas y seis compartidas con los países vecinos. Los autores concluyen que el uso del SPI para la caracterización de las sequías es práctico y es coherente con los análisis aquí realizados de los impactos de la sequía.

Lloyd-Hughes y Saunders (2002) (citados por Hong *et al.*, 2005) compararon el SPI con el PDSI, con los cuales se calcularon en una cuadrícula de 0.5° a través de toda Europa sobre escala de tiempo de 3 a 24 meses. Concluyeron que el SPI proporciona una estandarización espacial mejor que el

PDSI con respecto a acontecimientos extremos de la sequía, y el SPI es una herramienta simple y eficaz para el análisis de la sequía.

En otro estudio, el SPI fue utilizado con éxito como una herramienta para detectar patrones de la precipitación en el noreste de España (Lana *et al.*, 2001, citada por Hong *et al.*, 2005). El SPI, además, fue utilizado para la supervisión del tiempo real o el análisis retrospectivo de sequía/inundación en Argentina (Seiler *et al.*, 2002), Canadá (Anctil *et al.*, 2002), Corea (Min *et al.*, 2003) y Suráfrica (Rouault y Richard, 2003), (citados por Hong *et al.*, 2005).

Después de evaluar 14 índices de sequía usando un sistema estimador de seis criterios de la evaluación, Keyantash y Dracup (2002), (citados por Hong *et al.*, 2005) encontraron que el SPI es un instrumento valioso de la severidad de la sequía. En una escala global, el NDMC está enterado de cerca de 60 países que están usando el SPI para la supervisión y la investigación de la sequía. (Hong Wu *et al.*, 2005).

Álvarez *et al.* (2000) evaluó la presencia y comportamiento de la sequía en el Estado de Jalisco, utilizando el SPI, (McKee *et al.*, 1993), en donde valores negativos clasifican la sequía y positivos la humedad. El índice se aplica a 31 series de precipitación durante el periodo comprendido de 1961-1998, en el temporal de lluvias (Junio-Septiembre). Al comportar el SPI con la variable rendimiento/tonelada de maíz para el Estado en el periodo de 1982-1999, los resultados indican que los años más severos con sequía son 1969 y 1982, siendo este año donde la sequía se extiende la mayor parte del Estado, coincidiendo con la reducción de la producción de maíz de 1'470,508 toneladas con respecto al promedio anual de 2'119,090.

4.3. METODOLOGIA

En este estudio se hizo uso del **SPI** como indicador de la deficiencia de precipitación para el estado de Zacatecas porque permite caracterizar cuantitativamente la sequía, para diferentes zonas del Estado y/o para los municipios y sus comunidades, en escalas de tiempo diferentes. Esto brinda la posibilidad de establecer en forma retrospectiva alguna relación entre la sequía y sus efectos en las actividades de la agricultura de temporal (siniestros) y la ocurrencia de incendios forestales.

4.3.1 Ubicación Geográfica del Estado de Zacatecas

Junto con 31 entidades federativas, el estado de Zacatecas forma parte de los Estados Unidos Mexicanos. Se encuentra en la parte Centro – Norte, al noroeste de la capital Mexicana, entre los paralelos 21° 09' y 25° 09' N y los meridianos 100° 47' y 104° 10' de longitud oeste. Su extensión es de 73,252 Km², según cifra de la Secretaria de Programación y Presupuesto (SPP) del Gobierno del estado de Zacatecas. Ocupa el octavo lugar en extensión de la Republica, después de Tamaulipas, Jalisco, Oaxaca, Durango, Coahuila, Sonora y Chihuahua.

La mayor parte del territorio zacatecano está ubicado dentro de una región llamada Altiplanicie Mexicana, y el resto pertenece a otra región de nombre Sierra Madre Occidental. Los límites estatales son muy irregulares y han sufrido frecuentes variaciones con el tiempo. Colinda al norte con Coahuila, al noroeste con Nuevo León, al este con San Luis Potosí, al sur con Aguascalientes y Jalisco, y al suroeste con Nayarit y al oeste con Durango (Figura 4.1).



Figura 4.1 Mapa de la republica Mexicana y ubicación del estado de Zacatecas.

4.3.2 Método de análisis

El método de análisis para la caracterización de la sequía, como ya se menciona arriba es el SPI porque permite cuantificarla en escalas de tiempo diferentes y el cual es parte del programa SIG_GESEZA 1.0, fue diseñado por el Dr. Israel Velasco Velasco, que consiste en conjunto de funciones personalizadas realizadas sobre la plataforma de ArcView 9.0.

Las funciones personalizadas son:

- Acceder a la base de datos GESEZA para consultar, modificar, agregar datos de precipitación o estaciones climatológicas.
- Calcular el SPI para una escala de 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 36, y 48 meses de cada una de las estaciones y obtener los valores en archivo Excel y actualizarlo en el caso de que se haya agregado información en GESEZA.
- Generar entradas de SPI. Crear archivos para generar mapas que representen el SPI.
- Generar entradas de isoyetas. Crear archivos para generar mapas de isoyetas de precipitación.
- Generación de mapas. En esta función el programa crea los mapas correspondientes según sea el caso: mapas de SPI o mapas de isoyetas.
- Los mapas que se obtienen se pueden modificar y editar para una mejor presentación.

4.3.3 Aspectos teóricos del Índice del SPI

La metodología para el cálculo del SPI se fundamenta en el ajuste de una serie de registros históricos de precipitación total mensual a la función de

distribución probabilística de tipo "Gamma incompleta" (Thom 1966, citado por Edwards y Mckee, 1997).

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad \text{para } x > 0 \quad \dots\dots\dots 1$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} \quad \text{Función Gamma} \quad \dots\dots\dots 2$$

Para obtener soluciones máximas de probabilidad se usan valores óptimos de α y β de la siguiente manera (Thom 1947, citado por Caskey, 1958).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad \text{es el parámetro de forma} \dots\dots\dots 3$$

$$\beta = \bar{x} / \alpha \quad \text{es el parámetro de escala} \quad \dots\dots\dots 4$$

Donde: \bar{x} es la media de los datos en mm.

A se calcula con la siguiente formula,
$$A = \text{Ln}(\bar{x}) - \frac{\sum \text{Ln}(x)}{n}$$

n es el número de observaciones de precipitación

x Es el valor de la precipitación en mm.

La distribución acumulada esta dada por la ecuación.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad \dots\dots\dots 5$$

Haciendo $x = t\hat{\beta}$ y sustituyendo en la ecuación 5 se obtiene la ecuación:

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x t^{\hat{\alpha}-1} e^{-t} dt \quad \dots\dots\dots 6$$

La cual se llama **Función de distribución Gamma incompleta**. Como en un registro de precipitación es frecuente encontrar valores cero de precipitación y como la función gama no esta definida para $x = 0$ entonces se hace la transformación a la siguiente ecuación:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad \dots\dots\dots 7$$

Donde:

q es la probabilidad de ceros y se obtiene con la ecuación, $q = \frac{m}{n}$

m es el número de ceros en una serie de tiempo en la precipitación.
n es el numero de datos de precipitación, (Thom 1966 citado por Edwards y MacKee, 1997).

La probabilidad acumulativa, **H(x)** obtenida, se transforma entonces a la normal estándar **Z**, con una **media de cero** y **desviación uno** que es el valor del **SPI**. Para obtener la transformación de los datos resultantes a la función **Z** se utiliza una aproximación que proveen Abramowitz y Stegun (1970).

$$Z = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ Para } 0 < H(x) \leq 0.5 \dots\dots\dots 8$$

$$Z = \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \text{ Para } 0.5 < H(x) < 1 \dots\dots\dots 9$$

Donde: $c_0 = 2.515517$ $d_1 = 1.432788$
 $c_1 = 0.802853$ $d_2 = 0.189269$
 $c_2 = 0.010328$ $d_3 = 0.001308$

$$t = \sqrt{\text{Ln}\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \dots\dots\dots \text{Para } 0 < 0.5 \leq H(x) \dots\dots\dots 10$$

$$t = \sqrt{\text{Ln}\left(\frac{1}{(1-H(x))^2}\right)} \text{ Para } 0.5 < H(x) < 1 \dots\dots\dots 11$$

La ecuación 8 calcula los valores del SPI (**Z**) negativos y la ecuación 9 calcula los valores del SPI positivos. En otras palabras, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Bajo este contexto, valores negativos del SPI indica una intensidad en el déficit de humedad. Por otro lado, precipitaciones superiores al promedio histórico representa condiciones de humedad más altas de lo esperado. El Cuadro 4.1 muestra el sistema de clasificación que enlaza el SPI con intensidades de sequía, en el cual se observa que los valores positivos representan diferentes clases de humedad y los valores negativos diferentes clases de sequía.

SPI	Condición
+1.91 o más	Excepcionalmente húmedo
+1.51 a +1.9	Extremadamente húmedo
+1.21 a +1.5	Muy húmedo
+0.71 a +1.2	Moderadamente húmedo
0.51 a 0.7	Humedad incipiente
+0.5 a -0.5	Condiciones "normales"
-0.51 a -0.7	Sequía "anormal" o incipiente
-0.71 a -1.2	Sequía moderada
-1.21 a -1.5	Sequía severa
-1.51 a -1.9	Sequía extrema
-1.91 o menos	Sequía excepcional o catastrófica

La ecuación 5 calcula los valores del SPI (Z) negativos y la ecuación 6 calcula los valores del SPI positivos.

En la ecuación 1 la función Gamma no esta definida para $x = 0$; pero en una distribución de precipitación es frecuente que si tenga valores cero como datos, entonces la probabilidad acumulativa se convierte en:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \dots\dots\dots 9$$

Donde:

q es la probabilidad de cero.

Si m es el número de ceros en una serie de tiempo en las precipitaciones, Thom 1966, citado por Edwards y Mckee, (1997) dice que q puede ser estimada por m/n .

Esto es: $q = \frac{m}{n}$

Donde:

n es el numero de datos de precipitación.

4.4. RESULTADOS

4.4.1 Análisis de la precipitación en el Estado

En este apartado se utilizó la base de datos GESEZA 1.0 para el estudio del comportamiento de la precipitación del estado de Zacatecas y el SIG_GESEZA para el estudio de la precipitación en el Estado zonificando los municipios entre isoyetas.

La precipitación media anual histórica en el estado de Zacatecas es de de 448.72 mm. La mayoría del Estado es considerado como seco, ya que en el centro norte los cocientes de precipitación/evapotranspiración potencial son menores a 0.6, lo que indica un faltante de precipitación; en contra parte en el sur, la zona de los Cañones de Juchipila y Tlaltenango, estos cocientes son de 0.9 a 1.0 lo que indica que la precipitación cubre la demanda de agua perdida por evapotranspiración.

El norte y sureste del Estado, es considerado como el más seco ya que su precipitación media histórica es de 333 mm, lo que indica, que todas las actividades productivas estarán mas afectadas por los frecuentes faltantes de precipitación en el norte y sureste del Estado, que en el resto (Figura 4.2).

4.4.2 Comportamiento de la precipitación y la actividad agrícola de temporal

La actividad agrícola de temporal en el Estado de Zacatecas, se desarrolla aproximadamente en más de 1 millón de hectáreas, esta gran superficie se localiza principalmente en los Distritos de Desarrollo Rural (DDR.) de Río Grande, Fresnillo, Zacatecas y Ojocaliente localizándose entre las isoyetas 475 y 350 (Figura 4.2). Cuando se haga inferencia sobre la zona de temporal siniestrada, se estará refiriendo a la anterior.

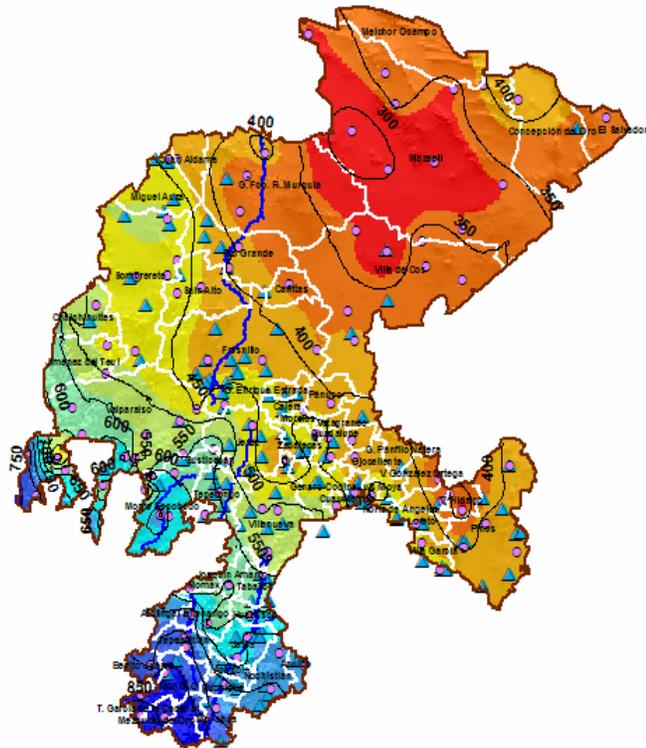


Figura 4.2. Mapa de Isoyetas del estado de Zacatecas.

A nivel nacional, la más importante superficie de fríjol de temporal se encuentra localizada en el estado de Zacatecas. Los municipios que la componen son Río Grande, Miguel Auza, Juan Aldama, Saín Alto y Sombrerete todos del DDR Río Grande. La superficie media que se siembra de fríjol de temporal, es de alrededor de 300,000 ha, en las cuales se producen alrededor de 180,000 toneladas de fríjol por ciclo agrícola. Esta gran superficie se localiza entre las isoyetas, 425 a 500 (Figura 4.2).

Sólo como ejemplo, se analiza la precipitación para varias estaciones climatológicas del DDR de Río Grande (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Años que registran precipitación por arriba y por abajo de la precipitación media, en tres estaciones climatológicas del estado de Zacatecas.

Estaciones	Años abajo	Años arriba	Total años	Año con mayor precipitación	Año con menor precipitación
Col González Ortega	23	13	36	2004	1989
Juan Aldama	18	13	31	2004	1982
Río Grande	18	14	32	1989	1981

En la estación climatológica Colonia González Ortega, se encontró que el año 1989 fue el más seco, registrando 204 mm; es decir la precipitación registrada fue 66.6% menor que la media. El año más húmedo fue 2004, registrando 838 mm. Esto es, la precipitación registrada fue 81,9% mayor que la media de 450 mm. (Figura 4.3). También se encontró que en 23 años se presentó una precipitación menor que la media y en 13 años por encima de la media, en el periodo de 1970 al 2005.

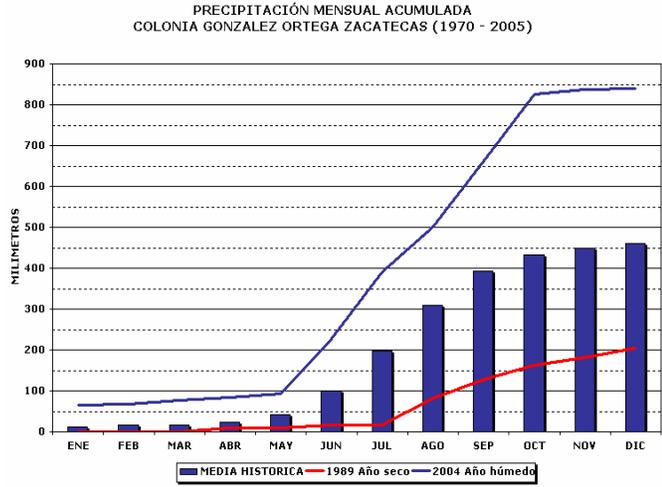


Figura 4.3 Estación Colonia González Ortega.

En la estación climatológica de Juan Aldama, se encontró que el año de 1982 fue el más seco registrando 247 mm; es decir la precipitación registrada fue 42.3% menor que la media. El año más húmedo fue el 2004 registrando 623 mm, es decir la precipitación registrada fue 87.7%, por encima de la media de 428 mm. (Figura 4.4).

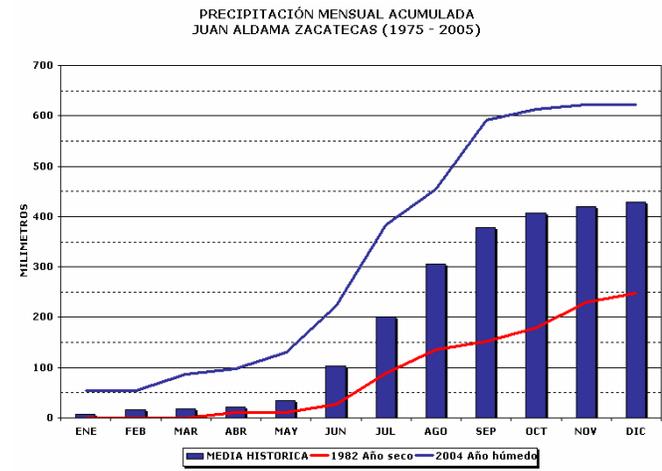


Figura. 4.4 Estación Juan Aldama.

También se encontró que en 18 años se presentó una precipitación menor que la media y en 13 años por encima de la media, en el periodo de 1975-2005. En la estación climatológica de Río Grande, se encontró que el año 1989 fue el más seco registrando 249 mm; es decir la precipitación registrada fue 42.3% menor que la media de 400 mm. El año más húmedo fue el de 1981 registrando 589 mm. Es decir la precipitación registrada fue 48.5% por encima de la media de 400 mm. (Figura 4.5). También se encontró que en 18 años tuvieron una precipitación menor que la media y en 14 años por encima de la media, en el periodo de 1974 – 2005.

La localización de las tres estaciones es en la misma zona agrícola, sin embargo la distribución en cantidad y oportunidad de la precipitación es diferente, como se muestra en el cuadro 4.2 donde se puede observar que cerca de 60% de los años han tenido una precipitación menor que la media.

4.4.3 La caracterización de la sequía mediante el uso del SPI y su relación con los siniestros de cultivos de temporal

En este apartado se entiende por siniestros a la falta de precipitación y cuando los cultivos tuvieron un rendimiento menor que el promedio histórico. La caracterización de la sequía del estado de Zacatecas, se hizo para un periodo de 15 años, de 1990 al 2005 ya que solo se dispone de información estadísticas de siniestros para ese periodo. Se realizó empleando los datos de precipitación de las 117 estaciones, que están distribuidas en todo el Estado, las cuales se almacenaron en una base de datos llamada GESEZA.

El Cuadro 4.3 muestra la cantidad de hectáreas sembradas y el porcentaje de pérdida por sequía, en el periodo mencionado y se encontró que los años de mayor pérdida fueron 1992, 1997, 1999, 2001 y 2005 que fue el que sobresalió con un porcentaje de pérdida de 47.8% de la superficie total sembrada, en la zona de temporal.

Sólo se presentan los mapas y los valores del SPI de los años de 1999 y 2005. En el año 1999 se sembraron 1'098,750 ha de las cuales se perdieron 460,499 ha. que representan 47.8%. Analizando el mapa del estado de Zacatecas

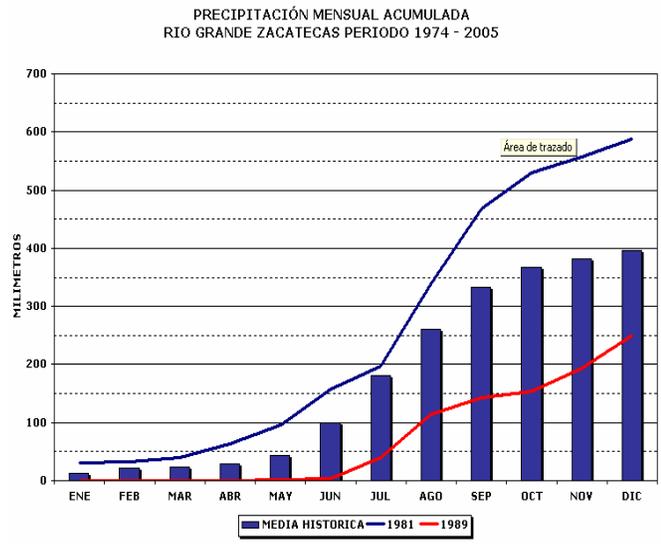


Figura 4.5 Estación Río Grande.

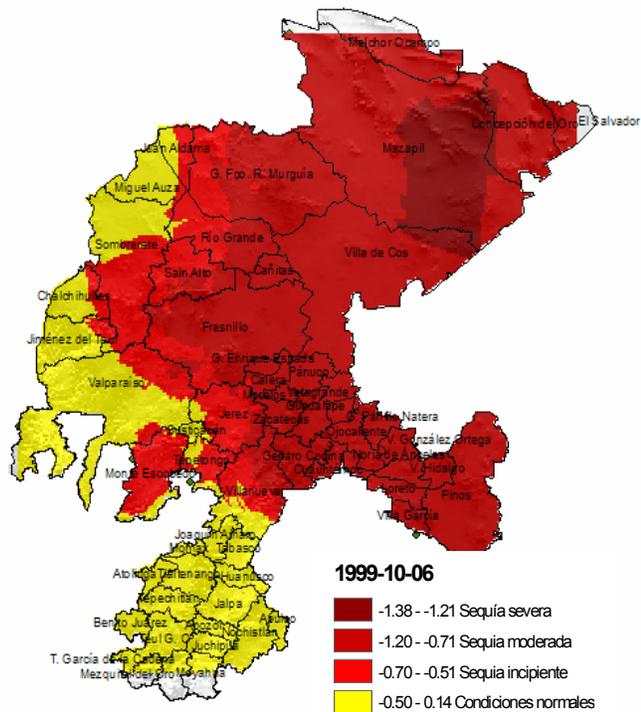


Figura 4.6. SPI escala 6 meses, con inicio al mes de octubre del año 1999.

que contiene los valores del SPI, a una escala de 6 meses con inicio al mes de octubre (Figura 4.6), se encontró que la zona de temporal presento sequía moderada y sequía incipiente, y una pequeña zona de condiciones normales de sequía, según el calculo del SPI, de esta forma se corrobora la perdida de cosechas por sequía. También se puede observar a nivel de municipio, que los más afectados fueron Río Grande, Sombrerete, Villa de Cos Fresnillo, Ojocaliente, Villa Hidalgo, Loreto, Sain Alto, Calera y Zacatecas.

Cuadro 4.3. Superficie sembrada y perdida por sequía en el estado de Zacatecas.

Año	Sembrada (ha)	Perdida (ha)	Perdida en %
1990	1'096,358	21,167	2.00
1991	1'009,921	57,132	5.66
1992	922,850	324,539	35.17
1993	976,645	114,095	12.00
1994	1'051,024	108,061	10.00
1995	1,080,150	143,293	13.26
1996	1'121,916	61,332	5.47
1997	1,096,230	330,137	30.12
1998	1'078,059	36,937	3.42
1999	1'098,750	460,499	41.91
2000	1'113,216	365,468	33.00
2001	503,347	153,409	30.47
2002	541,130	12,660	2.33
2003	548,470	15,721	2.87
2004	490,016	45,924	9.37
2005	1'014,723	484928	47.78
TOTAL	13,728,082	2,735,302	19.92

En la Figura 4.7, se puede observar que la mayoría de las 117 estaciones climáticas, reportaron un SPI negativo para el año de 1999, lo cual confirma que ese año en particular se registró un fuerte faltante de precipitación durante el ciclo de cultivo del maíz y del frijol, ocasionando fuertes pérdidas de cosecha.

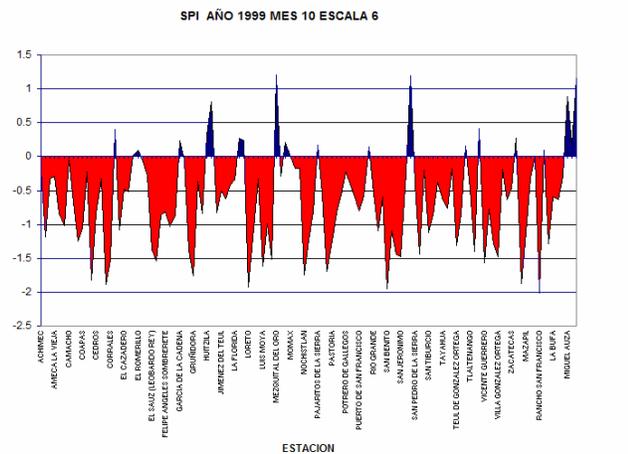
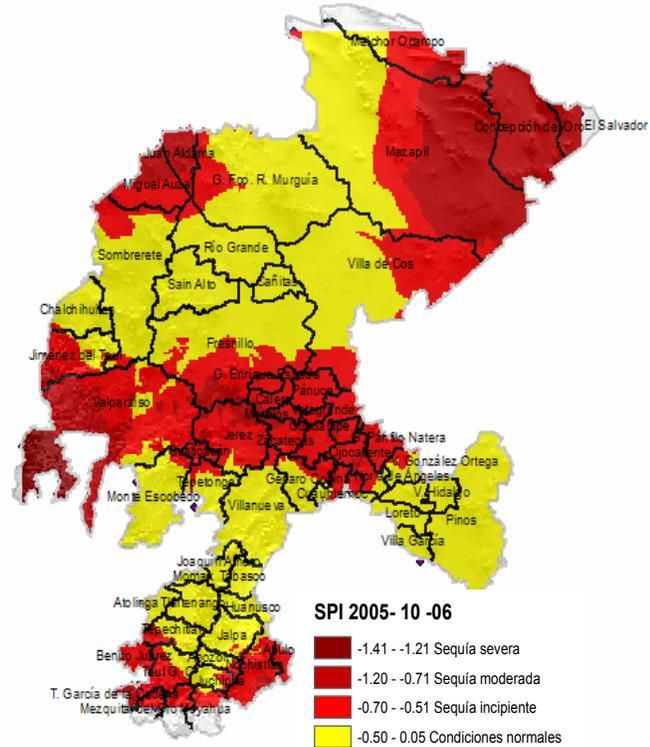


Figura 4.7 El SPI escala 6 meses, con inicio mes de octubre año 1999.

El año 2005, como ya se comento es el año con mayor pérdida agrícola, registrando un 44.8% de la superficie total sembrada en la zona de temporal. En la Figura 4.8; se presenta el SPI a una escala 6 meses, con inicio al mes de octubre y podemos observar en la zona de temporal, varias áreas con sequía severa, sequía moderada, sequía incipiente y condiciones normales. En particular, la zona mas importante donde se cultiva frijol de temporal, las condiciones fueron de sequía severa a sequía moderada, que incluyeron los municipios de Juan Aldama, Miguel Auza parte de Río Grande y de Sombrerete.



Esta situación de sequía reportada por el SPI, indica un faltante de precipitación y los cultivos presentaron una disminución del rendimiento; por lo tanto hubo una perdida de cosecha considerable para este año.

Figura 4.8 El SPI escala 6 meses, con inicio en mes octubre año 2005.

En el periodo de 1990 a 2005, se estimó que se perdieron por sequía, mas de 2'700,000 ha de siembra de temporal, lo que originó una pérdida económica cerca de los 36,000 millones de pesos.

Para explicar esto se construyó una gráfica, que relaciona la superficie siniestrada y los valores promedio del SPI, que fueron tomados de los mapas correspondientes de los años de 1999 al 2005. Del análisis de la Figura 4.9, se observa que 83.7% de la superficie perdida por sequía se encuentra en el cuadrante, donde el SPI es negativo, lo cual significa que hubo sequía a varios niveles, en esos años. Luego al analizar la curva a medida que el SPI se hace positivo, la superficie perdida disminuye, lo cual significa que hubo condiciones de humedad favorables para obtener buen rendimiento.

Estos resultados del estudio del SPI como indicador de la sequía y su relación con los siniestros de cultivo de temporal por sequía, coinciden con los resultados encontrados por Álvarez *et al.*, (2000) quien trabajó con el SPI; y encontró que las bajas producciones de maíz de temporal se relacionaron con valores negativos del SPI.

4.4.4 Análisis de la sequía mediante el uso del SPI y su relación con los incendios de pastos y árboles forestales.

Los incendios de pastos y árboles forestales son provocados por el hombre de una forma directa e indirecta; pero también es el resultado de una sequía o falta de humedad. Los incendios provocados indirectamente por el hombre, se deben al depósito en envases de vidrio los cuales al romperse quedan en trozos a manera de lupa que cuando los rayos solares inciden en el trozo de vidrio, se inicia el incendio de pasto o de hojas de árboles; también a los fumadores que no tienen precaución al fumar sus cigarros, los arrojan sin apagarlos por lo tanto se inicia la quema de pastos y árboles, esto sucede sobre todo en las orillas de las carreteras o en otros lugares por donde pasa el hombre.

Los incendios provocados directamente por el hombre son los que él mismo inicia; por ejemplo al poner fuego para calentar sus alimentos y al tratar de eliminar una extensión de maleza, pero se descuida y no puede controlar el fuego. En el estado de Zacatecas, principalmente los meses de enero a junio son meses en que la precipitación es errática, por lo tanto existen condiciones para que ocurran incendios.

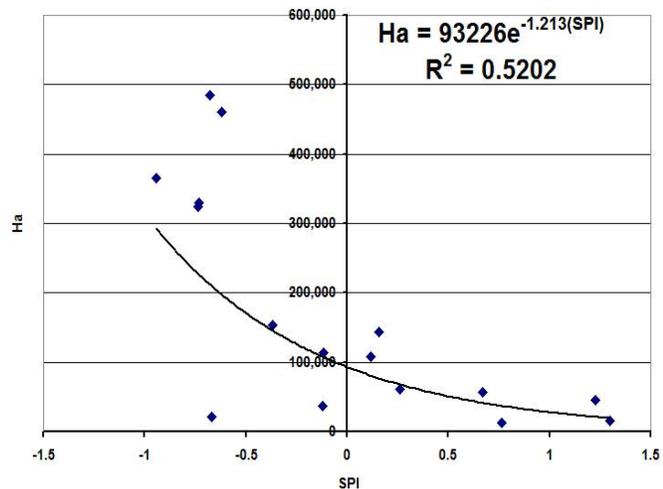


Figura 4.9 Relación entre hectáreas perdidas por sequía y el SPI.

Analizando las estadísticas de incendios forestales de 1998 al 2005 del Estado, proporcionadas por la Comisión Nacional Forestal, Gerencia Regional VII, se encuentra que los meses donde se registraron los incendios son: marzo, abril y mayo, como se puede observar en la figura 4.10. En la figura 4.11, se muestra la superficie total afectada y en la misma figura se observa que los meses de enero a junio, es donde se registra el mayor número de superficie afectada; y además, el año de mayor número de hectáreas totales afectadas, fue el año 2005, con una superficie total de 23,040 ha y el mes de junio con una superficie afectada de 7,641.2 ha.

Le sigue el año de 1999 con una superficie total de 7,299 ha y el año 2000 con un total de 5,337 ha; posteriormente el año 1998 y 2001 con una superficie afectada de 4,670 y 2,811ha respectivamente. En la Figura 4.12, se muestra la superficie afectada por municipio y sus respectivos años; en las cuales se puede observar que el año del 2005 fue el que más superficie registró y los municipios con mas superficie fueron Florencia de Benito Juárez, luego el municipio de Villa de Cos con 2,200 ha.; en seguida Teul de González Ortega con 2088.5 ha; y Cuahutemoc con 2,050 ha. En cambio, 2004 fue el año en que los municipios tuvieron poca área afectada por incendios (Fig. 4.12 y 4.14).

Del análisis de los mapas que se construyeron para el periodo de 1998 al 2005 sólo se muestran los años de 1998 y 2005, se concluye que el año de 1998 se presentó en los municipios (Figura 4.12), con sequía normal, sequía incipiente y sequía moderada y en pocos sequía extrema. Lo cual conlleva a ratificar que cuando en el periodo de enero a junio se presentan estas condiciones de sequía, es muy probable que se presenten incendios. Por otro lado, en el año de 2004 las condiciones fueron completamente diferentes. Los valores del SPI indicaron, que el escenario en la mayoría de los municipios donde se registran incendios, fue de muy húmedo y extremadamente húmedo. Cuando en el periodo de enero a junio se presenten estos valores del SPI lo mas probable es que no se tengan incendios de pastos y árboles forestales.

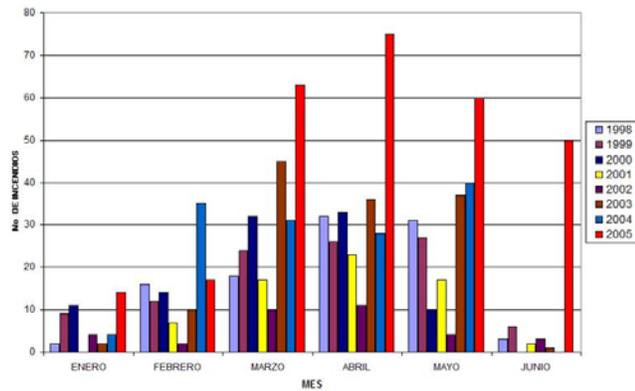


Figura 4.10 El número de incendios forestales en Estado de Zacatecas.

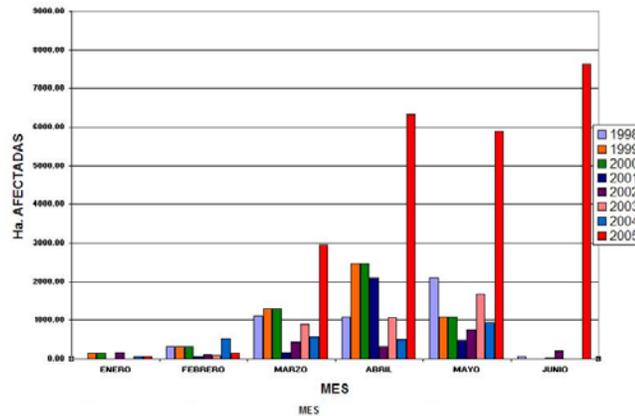


Figura 4.11. Superficie afectada por los incendios para el periodo 1998 – 2005.

En la grafica de la Figura 4.17, se observa que con los pocos datos existentes de superficie siniestrada por incendios y con el SPI, no fue posible encontrar una buena relación. Sin embargo, se puede decir que el 64% de la superficie afectada por los incendios se encuentra en el cuadrante donde el SPI es negativo, lo cual significa que hubo sequía en esas zonas; también se puede observar que el 8% de la superficie afectada tiene un valor del SPI de cero o sea condiciones normales; y el 29% de esa superficie se encuentran en el cuadrante positivo. Luego al analizar la recta, a medida que el SPI es positivo, el número de hectáreas siniestradas disminuye.

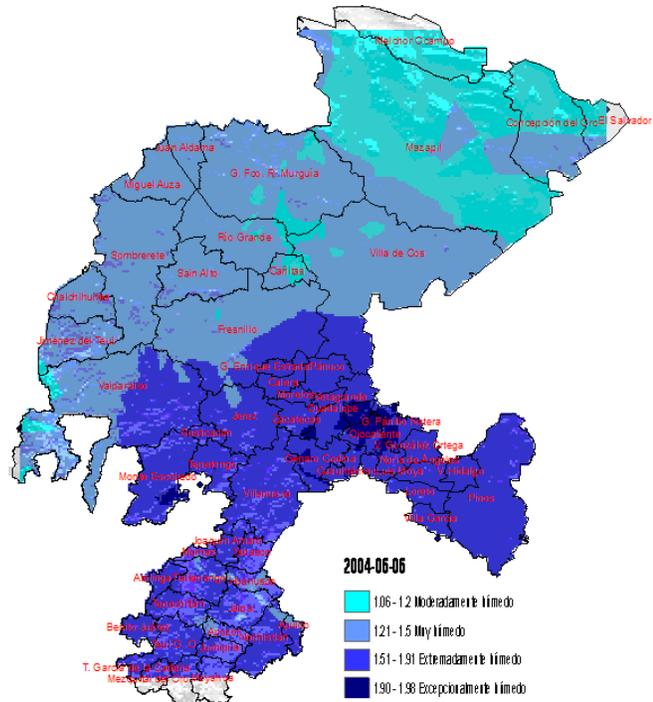


Figura 4.14. El SPI a escala 6 meses, con inicio al mes de junio año 2004.

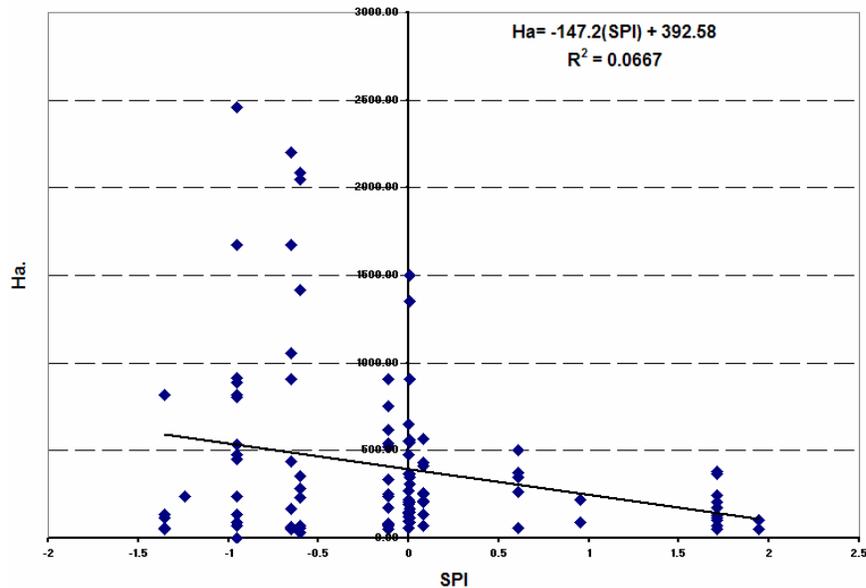


Figura 4.17. Superficie siniestrada por los incendios y valores del SPI.

4.5. ACCIONES Y CONCLUSIONES

El programa SIG_GESEZA es un programa de cómputo que calcula fácilmente el SPI y puede representarlo en mapas del Estado de Zacatecas en zonas por colores, además calcula el SPI en forma particular en una estación. Este sistema es una herramienta muy útil para el monitoreo y poder corroborar si en alguna comunidad, municipio o varios municipios se presentó el fenómeno de la sequía, en una forma rápida.

SIG_GESEZA esta disponible para que los tomadores de decisión lo usen, para el monitoreo de la sequía del estado de Zacatecas.

El índice empleado en este estudio, fue el SPI el cual es un instrumento valioso para el monitoreo de la sequía y requiere únicamente de datos de precipitación.

Es posible estimar los valores del SPI, de manera eficiente ya que da seguimiento a la evolución de un evento de sequía a través del tiempo, permitiendo conocer su inicio, su intensidad, duración y su terminación.

El SPI permite efectuar estimaciones de sequía para a periodos de tiempo variados. Esto brinda la posibilidad de establecer la relación entre la sequía y ciertos fenómenos de distinta magnitud temporal, tales como el desarrollo de cultivos y su producción y el impacto de la temporada de ocurrencia de incendios forestales.

En el caso de la agricultura de temporal, se pudo determinar que existe una buena relación entre la superficie siniestrada por sequía y el SPI, por lo tanto se recomienda usar el SIG.GESEZA y SPI para el monitoreo de la sequía, en la zona de temporal y además, este sistema le permitirá a los tomadores de decisión, el disponer de elementos técnicos sobre el estado que guarda físicamente la sequía a nivel de municipio y sus comunidades; y contar con los argumentos necesarios para definir con claridad los planes y programas para su mitigación.

En el caso de los incendios forestales, se puede decir que a medida que el valor del SPI tiene signo negativo, existen posibilidades de que se presenten incendios. También en este apartado, la SEMARNAT dispone en este sistema de un instrumento valioso para monitorear la sequía, en escala de 3 meses a nivel de municipio y sus comunidades y así anticiparse en tiempo y forma a diseñar una campaña para la detección y control de los incendios.

A medida que exista un conocimiento amplio sobre la sequía, se estará en la capacidad de concebir y ejecutar estrategias adecuadas para la mitigación de los impactos ocasionados por la misma.

4.6. LITERATURA CITADA

Abramowitz, Milton and Stegun Irene A. 1970: Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc., NewYor 1046 pp.

Álvarez, P. S., Ortiz S. C. y Tereshchenko I. 2000. *Sequías en el Estado de Jalisco*. <http://www.ugm.org.mx/pdf/geos00-3/ATM00-3.pdf>.

Bali, J. (2001). *Nuestro México ¿de veras se seca?*. Revista México Desconocido. Número 295. Año XXV.

Castorena, G., Sanchez E., Florescano, E., Padillo, G. y Rodríguez L. 1980. *Análisis histórico de las sequías en México*, Secretaria De Agricultura De Recursos Hidráulicos No 22.

CEISS, 2004. <http://www.sequia.edu.mx/hemeroteca>.

Edwards Daniel C. and McKee Thomas B. 1997. *Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales*. Climatology Report No 97-2. Colorado State University. Department of Atmospheric Science, Paper No. 634. 155 pp.

Giddings L., Soto M., Rutherford and Maarouf a. 2005. *Standardized precipitation index zones for México*. *Atmósfera* pp. 33-56.

National Drought Mitigation Center (NDMC). 2002. <http://drought.unl.edu> University of Nebraska, Lincoln, United States of America.

NDMC, 2005. National Drought Mitigation Center. <http://drought.unl.edu> University of Nebraska, Lincoln, United States of America.

Hong Wu, Michael J Hayes, Donald A. Wilhite and Mark D. Svoboda, 2005. *The effect of the length of record on the standardized precipitation index calculation*. *Internal Journal of Climatology* 25: 505 – 520.

McKee Thomas B., Doesken Nolan J. and Kleist John 1993. *The relationship of drought frequency and duration to time scales*, Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California Department of Atmospheric Science, 17-22 pp.

McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1995: *Drought monitoring with multiple time scales*. Pre prints, 9th Conference on Applied Climatology, 15-20 January, Dallas, Texas, American Meteorological Society, 233-236 pp.

Mojarro D. F., Vealsco V. I. Gutiérrez N. J. A. 2004. *Sequía en la cuenca alta del río Juchipila: uso del SPI y políticas sustentables de operación*. Segunda Jornada Sobre Sequía, CEISS, pp 15 -24.

Ponce V. M., Zúñiga C. W. R., Venegas C. R., Gaona A. T., García C. O. R., Sepúlveda B. J. I., Arámburo V. G. 2004.
http://ponce.sdsu.edu/tres_problemas_sequia01.html.

Tierraamerica, 2003. *La sequía*
(<http://www.tierraamerica.net/2003/0309/conectate.html>).

Velasco I., Valdés J. B. Velásquez J., and Kim T-W. 2004. *Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluente del río Bravo/Grande*. Ingeniería hidráulica en México, vol. XIX, num. 3 pp. 37 -53, julio septiembre.

Velasco I. 2002. *Plan de preparación para afrontar sequías en el distrito de riego*. Tesis doctoral Universidad Nacional Autónoma de México, División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, México, 193 pp.

5. APTITUD DE LOS SUELOS Y PRÁCTICAS MECÁNICAS PARA AMINORAR EL EFECTO DE LA SEQUÍA

Francisco Echavarría Cháirez
Investigador del programa de Sistemas de Producción
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias
fehava@inifapzac.sagarpa.gob.mx

Alfonso Serna Pérez
Investigador del programa de Sistemas de Producción
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Adán Castillo Rosales
Investigador del programa de Labranza de Conservación
Campo Experimental Valle del Guadiana
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Jesús López Hernández
Investigador del programa de Mejoramiento Genético de Maíz
Campo Experimental Valle del Guadiana
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Arnulfo Pajarito Ravelero
Investigador del programa de Mejoramiento Genético de Frijol
Campo Experimental Valle del Guadiana
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Esteban S. Osuna Ceja
Investigador del programa de Conservación de Suelos
Campo Experimental Pabellón
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Jesús Reyes Chávez
Investigador del programa de Orégano
Campo Experimental La Laguna
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Sergio A. Ortega Rodríguez
Investigador del programa de Conservación de Zonas Áridas
Campo Experimental La Laguna
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

5. APTITUD DE LOS SUELOS Y PRÁCTICAS MECÁNICAS PARA AMINORAR EL EFECTO DE LA SEQUÍA

Francisco Echavarría Cháirez
Alfonso Serna Pérez
Adán Castillo Rosales
Jesús López Hernández
Arnulfo Pajarito Ravelero
Esteban S. Osuna Ceja
Jesús Reyes Chávez
Sergio A. Ortega Rodríguez

5.1. INTRODUCCIÓN

La corteza terrestre es la capa superficial de suelo, de espesor variable, que reposa sobre una masa de roca dura. Funciona como una capa de transición entre el sustrato rocoso y la vegetación; su espesor variable es el resultado de la transformación de la roca madre bajo la acción de diversos procesos físicos, químicos y biológicos, y está integrado en un conjunto de elementos minerales y orgánicos.

El suelo es un recurso necesario para el desarrollo de las actividades económicas agrícolas, ganaderas y forestales. El desarrollo del recurso suelo implica buena profundidad, cantidad de materia orgánica, texturas de medias a finas, sin fases físicas o químicas, etc., y este desarrollo es un factor importante para la realización de actividades productivas.

Lo anterior implica la identificación de las áreas con condiciones que pudieran ser indicativas de deterioro del suelo, siendo la erosión hídrica y eólica los principales indicadores del deterioro ambiental. Asimismo, la identificación de las limitantes naturales para el desarrollo de las actividades humanas directamente relacionadas con el suelo, como zonas con problemas de salinidad, pedregosidad, suelos someros, con bajos contenidos de materia orgánica, reducida disponibilidad de humedad, etc.

Las características que representan la aptitud de los suelos son aquellas que permiten el desarrollo de una actividad productiva aceptable y que es disponible para su uso. Por el contrario, una limitante es aquella que impide o restringe las actividades productivas y que, si estas áreas son explotadas, desencadenarán impactos ambientales negativos (incidencia de erosión, baja productividad, etc.), ya que dichos recursos no están disponibles. Como consecuencia de ello, se presenta el deterioro, la degradación y finalmente la desertificación.

El objetivo de relacionar las aptitudes, limitantes y niveles de deterioro de los recursos naturales permitirá el ordenamiento de las actividades productivas acorde a estas condiciones. Al existir una amplia variedad de suelos, estos pueden ser destinados a actividades apropiadas a sus potencialidades. Por otro lado, bajo limitantes naturales como la sequía u otras, el uso de los mismos será reorientado por criterios de sostenibilidad y manejo apropiado de los recursos.

En las siguientes secciones se revisan los orígenes del suelo y sus niveles de aptitud y algunas prácticas de manejo para aminorar el efecto de la sequía, asimismo, se describen los métodos de medición de erosión hídrica y eólica y al final se clasifican los suelos del estado de Zacatecas, de acuerdo con su aptitud productiva.

5.2. ORIGEN DEL SUELO

La corteza terrestre es la capa superficial de suelo, de espesor variable, que reposa sobre una masa de roca dura. Se prolonga bajo los océanos y es continua alrededor de la tierra. Su espesor medio es de alrededor de 35 kilómetros; la parte de la corteza terrestre compuesta de materiales sólidos constituye la litosfera y la recubierta por agua, hielo o nieve, la hidrosfera.

La litosfera o envoltura pétreo constituye la capa sólida, exterior de la tierra. Esta formada por diversas clases de rocas; tales como, el granito y la caliza. Las rocas están constituidas por sustancias más simples, los minerales; tales como, el cuarzo, el feldespato y la mica que forman el granito, o como la calcita, que constituye la base de la caliza o el mármol (Torres, 1981).

La altiplanicie Mexicana hasta antes del terciario, estaba ocupado por aguas marítimas. A partir del Terciario, tiempo en que las sierras Madre Oriental, Madre Occidental, Madre del sur y el eje neovolcánico formaron una gran cuenca cerrada y elevada, está, a través del tiempo se fue llenando de sedimentos aluviales y lacustres formados por gravas, arenas y arcillas. Al iniciarse el cuaternario hace un millón de años, los ríos del Pacífico y del Golfo iniciaron el drenado del altiplano, desapareciendo paulatinamente los lagos y sometiendo a toda el área a un proceso de intensa erosión que persiste aún en nuestros días (Trujillo, 1985).

Sin embargo, la capa rocosa que emergió del fondo del océano y dio forma al altiplano Zacatecano, dio también origen a los suelos que hoy cubren el espacio terrestre y dan sustento a las actividades forestales y agropecuarias.

El resultado final de la formación del suelo depende de los cinco factores edafogénicos siguientes (Birkeland, 1999):

MATERIAL PARENTAL. De acuerdo con el material original de donde se desarrolla el suelo, este puede adquirir sus características, como es la rapidez en la formación y desarrollo del suelo, textura y nivel de fertilidad. Las rocas ígneas (solidificación del magma), las cuarzosas y las areniscas producen suelos ligeros,

las rocas, las rocas básicas y sedimentarias de grano fino producen suelos arcillosos y las calizas pueden dar origen a suelos de diferentes texturas.

CLIMA. La lluvia, la temperatura y el viento son tres componentes climáticos que afectan en la formación del suelo, principalmente en contenido de materia orgánica, reacción del suelo, lixiviación y contenido de arcilla.

TOPOGRAFÍA. De acuerdo con la pendiente del terreno (entre otros factores), será la variación de la magnitud de la lámina de agua retenida o captada por el suelo el grado de erosión del mismo y como consecuencia la clase de terreno para diversos usos (factor muy importante para definir clases de suelo).

ORGANISMOS VIVOS. La cubierta vegetal y microorganismos son de suma importancia en el desarrollo del suelo; de ellos depende la acumulación de materia orgánica en diferentes grados de descomposición.

TIEMPO. El desarrollo del suelo requiere de mucho tiempo e incluye las etapas siguientes:

- a) Material Parental. Roca original que produce el material original del suelo.
- b) Suelo joven o inmaduro. Acumulación de materia orgánica en la capa superficial, escasa intemperización y escaso lavado y movimiento de coloides.
- c) Suelo maduro. Presencia del horizonte B (además del A y el C), poco desarrollado y con algunas semejanzas con el A, las principales diferencias entre A y B son el contenido de materia orgánica y el color del suelo.
- d) Suelo senil. Horizonte B completamente diferenciado del horizonte A. Acumulación en B de materiales coloidales provenientes de A, los cuales forman una capa impermeable que puede ser arcilla, humus, hierro o diversas mezclas. En esta etapa los suelos son poco fértiles.

La interacción de los procesos anteriores genera otros dos procesos conocidos como intemperismo y formación del perfil.

El intemperismo actúa por medio de los fenómenos meteorológicos para producir el material original del suelo.

Existen tres tipos de intemperismo: físico, químico y biológico (Brady y Weil, 2000).

El **intemperismo físico** no modifica la constitución química de la roca desintegrada.

Los factores que intervienen son el agua, el viento y la temperatura. El golpe del agua de lluvia sobre la roca, la erosión provocada por las corrientes y la

desintegración de los materiales rodados que los ríos y arroyos arrastran en su curso, son ejemplos claros del efecto de la acción intemperizante del agua.

En zonas donde la temperatura es inferior a 0°C, el agua depositada en ranuras de las rocas, al congelarse, aumenta de volumen, provocando fracturas en ella.

En las regiones semidesérticas y desérticas, en donde la vegetación es escasa y los vientos de alta velocidad son muy comunes, gran parte de la desintegración de las rocas es debida al golpe que producen contra ellas las arenas arrastradas en suspensión, produciendo aristas filosas.

Intemperismo químico. Los procesos que ocasionan la descomposición de los compuestos químicos que forman las rocas son: hidrólisis, carbonatación, oxidación y reducción. Como resultado de esta acción, se generan varias alteraciones de los constituyentes originales, formándose materiales secundarios.

Intemperismo biológico. El efecto de este factor en la intemperización de las rocas consiste tanto en las facturas que ocasionan las raíces de las plantas cuando penetran en la masa rocosa, como en la intensa acción química originada por los microorganismos y plantas inferiores.

En general, el intemperismo químico adquiere predominancia en las zonas lluviosas y calientes y el intemperismo físico en las áreas de escasa precipitación como el estado de Zacatecas.

Desarrollo del perfil del suelo. El grado de desarrollo del perfil manifiesta la intensidad de la acción de los factores edafogénicos o formadores de suelo (Birkeland, 1999).

En términos generales los suelos de mayor desarrollo del perfil corresponden a los suelos dedicados a actividades agrícolas. Los horizontes O, A y B son los horizontes donde se realiza la actividad productiva y estos pueden variar en profundidad de 30 a 100 cm. Los suelos desarrollados *in situ*, generalmente son menos profundos. En cambio los suelos que son producto de arrastre o erosión como son los aluviales, glaciales y eólicos son profundos y sin horizontes diferenciados.

Los suelos dedicados a actividades pecuarias y forestales normalmente son de formación reciente, suelos jóvenes e inmaduros, donde únicamente se identifican los horizontes A y C, porque el horizonte B está en proceso de formación y sus características aun son indefinidas.

Subsuelo. Prácticamente el subsuelo se origina a partir del horizonte C, que debido al reducido efecto del intemperismo, presenta todavía características semejantes al material parental. Es de fertilidad escasa y reducida actividad microbiana. Muchos de los suelos Zacatecanos que se explotan con fines

pecuarias son suelos donde el horizonte C es el suelo superficial porque el horizonte A ha desaparecido por efecto de la erosión.

5.3. DEGRADACIÓN DE SUELOS

La degradación de los suelos es definida por la por la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la desertificación (UNCED, 1992) como “el proceso que rebaja la capacidad actual y potencial del suelo para producir bienes y servicios”. A partir de la reunión sobre degradación de suelos realizada en Roma en 1974 (FAO, 1980), se definieron seis tipos de degradación que son: 1) la erosión hídrica; 2) la erosión eólica; 3.) la degradación biológica, la cual se asocia con la disminución de materia orgánica y fertilidad del suelo; 4) la degradación química, la cual se refiere a problemas de acidificación y toxicidad; 5) el exceso de sales y sodificación; y por último, 6) la degradación física, la cual se refiere a los cambios adversos en las propiedades físicas del suelo, como son la porosidad, permeabilidad, densidad aparente o de volumen y estabilidad estructural (FAO, 1980). Este último tipo de degradación afecta tanto áreas agrícolas, donde el uso excesivo de maquinaria produce efectos negativos, como áreas de uso pecuario como los agostaderos, donde la degradación física es consecuencia del sobrepastoreo. El efecto negativo de la degradación física es mayor cuando ésta se asocia a otros tipos de degradación, siendo esta un factor que favorece el escurrimiento y la erosión hídrica, además de contribuir al incremento de la degradación biológica al reducir la cobertura vegetal y el contenido de materia orgánica del suelo, lo cual agrava en general el efecto degradativo en los suelos, incrementando el riesgo de desertificación. La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo en su glosario (1997) define la degradación “como el proceso a través del cual un compuesto es transformado en componentes más simples”. Por otro lado, la desertificación fue definida en 1992, como “la degradación de las tierras de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas” (UNCED; 1992).

Un camino hacia la disminución de la degradación de suelos, y por consiguiente de la desertificación, es a través de la reconversión productiva. El término reconversión es usado para referirse a la acción de cambiar la actividad productiva de áreas de baja aptitud productiva hacia una actividad de menor nivel extractivo (DOF, 2002), como en el caso de cambiar de la actividad agrícola hacia la pecuaria. A principios de los años 70`s, diversas políticas gubernamentales estimularon el incremento de la producción agrícola por la vía del incremento de la superficie laborable. Como consecuencia, se abrieron al cultivo suelos de baja aptitud productiva, los cuales no alcanzarían el nivel mínimo necesario para considerarse aptos para el uso agrícola. Para rescatar dichas áreas que erróneamente se abrieron al cultivo, se requiere la identificación de las mismas. Existen procedimientos de campo que permiten actualizar la información disponible y separar las áreas de menor aptitud a nivel ejidal (Echavarría, *et al*, 2004). Sin embargo, cuando la identificación de la aptitud productiva es necesaria para guiar la reconversión productiva a nivel estatal, los métodos basados en la capacidad productiva de cada unidad de suelo (SEMARNAT, 2000) son los más apropiados.

Al revisar las leyes federales vigentes relacionadas con el uso de los recursos naturales como son, la “Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente”, “Ley general de vida silvestre”, “Ley general de desarrollo forestal sustentable” y “Ley de aguas nacionales” (Diario Oficial de la Federación, 1988, 2002, 2003, 2004), no se encontró una mención directa sobre el tema de reconversión. En la Ley de desarrollo rural sustentable (Diario Oficial de la Federación, 2003), en el capítulo sobre reconversión productiva, en el artículo 53, la reconversión se interpreta como “la incorporación de cambios tecnológicos, y de procesos que contribuyan a la productividad y competitividad del sector agropecuario, a la seguridad y soberanía alimentarias y al óptimo uso de las tierras mediante apoyos e inversiones complementarias”. Asimismo, en la Ley de desarrollo forestal sustentable, aunque no se menciona el término de reconversión, se mencionan conceptos como “cambio del uso del suelo en terreno forestal, restauración forestal, terreno preferentemente forestal y conservación forestal”. De lo anterior se infiere que el objetivo de la reconversión productiva es promover el establecimiento de las actividades de producción agropecuarias y forestales en áreas de buen potencial productivo y/o aptitud productiva, que sean competitivas y de manera sustentable.

Los conceptos de potencial productivo y aptitud productiva difieren en los elementos que lo constituyen, como en la finalidad de los mismos. Los estudios de potencial productiva sirven para identificar las áreas más adecuadas del medio físico para lograr la mayor eficiencia energética del cultivo de interés y obtener en consecuencia mayores rendimientos y mejores utilidades respecto a la inversión que se realice (Medina, 1997). Los estudios de potencial productivo tienen como base la información topográfica, climática, suelos y los requerimientos de los cultivos de los que se desea determinar su potencial (Medina, 1997). En cambio los estudios de aptitud productiva identifican las áreas de mayor capacidad productiva para todos los cultivos que puedan desarrollarse en un sitio específico, agrupando aquellos sitios que son un medio óptimo para el desarrollo de cultivos y dividiendo estos en cuatro clases de mayor a menor aptitud. Asimismo, clasifica las áreas de agostadero en las mismas cuatro clases, identificando las de mayor a menor aptitud productiva.

Sin embargo, independientemente de si los estudios son de identificación de potencial productivo o de aptitud productiva, estos deberán ligarse a acciones de ordenamiento territorial, de conservación del recurso o de asignación de apoyos por parte de dependencias gubernamentales. Dado el carácter básico de los estudios de aptitud productiva, los cuales permiten su asociación con acciones de reconversión productiva, se identifican los niveles de aptitud y se relacionan con acciones graduales de cambio que desembocan en la reconversión productiva.

De acuerdo con los conceptos identificados en las leyes mencionadas previamente y que son las que actualmente rigen el uso de los recursos naturales en nuestro país, los términos relacionados con la reconversión son: “Cambios

tecnológicos, Conversión de cultivos, Reconversión productiva y Recuperación de zonas degradadas”.

Tanto los criterios considerados para integrar la definición del concepto, su definición, el orden lógico de complejidad de las acciones sugeridas y su asociación con niveles de aptitud tanto de áreas agrícolas como pecuarias son discutidos adelante.

MEDIDAS DE RECONVERSIÓN ASOCIADAS A NIVELES DE APTITUD

Dada la falta de una definición clara del concepto de reconversión se revisaron las leyes vigentes que regulan el uso de los recursos naturales. Los términos identificados y que están relacionados con la reconversión son: “Cambios tecnológicos, Conversión de cultivos, Reconversión productiva y Recuperación de zonas degradadas”. En ellos se aprecia un gradiente de acciones tecnológicas que van desde la más elemental adopción de un componente tecnológico hasta, gradualmente, llegar al punto extremo que es la recuperación de suelos degradados.

CAMBIOS TECNOLÓGICOS

Los criterios involucrados en la definición de los cambios tecnológicos son de tipo agronómico, económico, de tiempo y de sustentabilidad. Los términos agronómicos se refieren a la inclusión de especies, cultivos o componentes tecnológicos que permitan expresar el potencial productivo correspondiente. En el aspecto económico, se considera la rentabilidad que dichos cambios debieran generar; el tiempo para su implantación se considera de un año o un ciclo de cultivo y la sustentabilidad se refiere a la restricción de utilizar solo aquellos componentes o cultivos que conserve y/o mejore la condición actual de los recursos naturales, y del sistema producto que se trate. Considerando lo anterior, los cambios tecnológicos se definen *“como el conjunto de adecuaciones o ajustes, a corto plazo, hechos a la tecnología dentro de las especies o cultivos establecidos en un área, con el objeto de mejorar la productividad y sustentabilidad”*. En términos generales, el uso de una variedad mejorada de maíz, la implementación de un sistema sencillo de pastoreo o el control del descortezador de los pinos, representan acciones del tipo definido como cambio tecnológico y representa el nivel más elemental en las acciones asociadas a la reconversión. Asimismo, este nivel de baja acción es asociado con un nivel de aptitud alto (clase uno).

CONVERSIÓN DE CULTIVOS

Siguiendo los mismos criterios en la definición del concepto de conversión de cultivos, en términos agronómicos, este concepto incluye cambio de especies o cultivos en las áreas agrícolas con potencial productivo o aptitud reducida para las especies que se siembran actualmente. En términos económicos se debe tener claro que la actividad productiva por la que se realiza el cambio, deberá tener una mayor rentabilidad que la actual. En cuanto al tiempo necesario para llevarla a cabo, esta deberá ser suficiente para que el cambio sea adoptado por el productor. Así, si piensa en un cultivo anual, este se considerará adoptado si lleva

tres años repitiendo el mismo cultivo anual o el mismo tiempo para el establecimiento de uno perenne. En términos de sustentabilidad, el cultivo alternativo deberá promover la conservación y mejorar la condición actual de los recursos naturales. El nuevo cultivo deberá promover una mayor cobertura al suelo o un menor número de prácticas de labranza, etc. Con base en lo anterior, la conversión de cultivos es *“la siembra de un cultivo o cultivos alternativos los cuales son sustituidos por otro que tiene una mejor adaptación agroecológica y con mayor competitividad”*. Ejemplos de ello son las siembras de avena en áreas de bajo potencial para frijol, establecimiento de otros frutales en áreas productoras de uva industrial o siembras de canola en lugar de maíz. Estas acciones se asocian con un nivel de aptitud dos.

RECONVERSIÓN PRODUCTIVA

En la definición de la reconversión productiva, el criterio agronómico considera el cambio por especies o cultivos alternativos con mayor aptitud para las áreas a reconvertir. En este caso, las alternativas propuestas tienen un menor grado de deterioro sobre los recursos naturales (erosión del suelo, reducción de escurrimiento y mayor captación de agua, etc.). En términos económicos, la actividad productiva por la que se realiza el cambio deberá generar una mayor rentabilidad que el actual, aunque esta se presente en el largo plazo (tres o más años). Finalmente, el sistema propuesto, sin aportaciones energéticas, deberá ser autoregenerable a través de un manejo integral. Por tanto, la reconversión productiva es *“el cambio de la actividad o del sistema, buscando aprovechar la aptitud potencial del área o sitio con un uso óptimo del suelo y reducir la siniestralidad”*. El tipo de actividades asociadas al concepto son del tipo de establecimiento de pastos en áreas agrícolas, con el objeto de producir carne de ovino, o la plantación de nopaleras en áreas agrícolas con problemas de sequía recurrente, etc. Estas acciones se asocian con un nivel de aptitud tres.

RECUPERACIÓN DE ZONAS DEGRADADAS

En el caso de la recuperación de zonas degradadas, el criterio agronómico considera el reestablecimiento inducido de especies nativas la cual se convierte en un área excluida al uso agropecuario y para ello incluye la participación de estructuras estabilizadoras de suelos como son bordos, surcos en contorno, presas filtrantes, gaviones, etc.). En términos económicos, la actividad productiva no sería el objetivo primordial y su enfoque esencial es el servicio a la sociedad (servicios ambientales). Su tiempo de establecimiento y funcionamiento es indeterminado (largo plazo) y estas debieran convertirse en áreas naturales protegidas. Por último su sustentabilidad la determina la rehabilitación del sistema. Con lo anterior la recuperación de zonas degradadas se define como *“el conjunto de actividades tendientes a la rehabilitación de un ecosistema degradado, con las cuales deberá tender a recuperar parcial o totalmente sus funciones originales con lo que se mantendrán las condiciones que propician la persistencia y evolución”*. Ejemplos de ello son la rehabilitación del Lago de Texcoco, la recuperación de suelos salinos y/o erosionados no productivos o la reforestación con fines de protección contra la erosión eólica (cortinas rompevientos). Estas acciones se asocian con un nivel de aptitud cuatro.

DEFINICIÓN DE LA APTITUD DE SUELOS EN ZACATECAS

Las acciones relativas a la reconversión productiva que se definieron anteriormente, requieren la identificación georeferenciada de cada nivel de aptitud productiva asociado a cada una de ellas. Para la definición de la aptitud de los suelos, se siguió la metodología desarrollada por SEMARNAT (2000), la cual se basa a su vez en los trabajos de agrología desarrollados por el Colegio de Postgraduados (1977). En esta metodología se utilizaron árboles de decisiones que muestran los criterios o parámetros que debe contener cada clase de aptitud. El manejo de la información se realizó a través del sistema de información geográfica IDRISI (Eastman, 1995).

5.4. MAPA DE APTITUD DE LOS SUELOS

Para la elaboración del mapa de aptitud de los suelos se presenta como ejemplo el Estado de Zacatecas, se siguió la metodología desarrollada por SEMARNAT (2000), la cual se basa a su vez en los trabajos de agrología desarrollados por el Colegio de Postgraduados (1982). En esta metodología se utilizaron árboles de decisiones que muestran los criterios o parámetros que debe contener cada clase de capacidad o aptitud. El manejo de la información se realizó a través del sistema de información geográfica IDRISI (Eastman, 1995).

Los insumos o bases de datos utilizados fueron los siguientes:

1. Carta edafológica 1:50000, elaborado por el CETENAL (CETENAL, 1972). Las cartas correspondientes al Estado de Zacatecas fueron digitalizadas.
2. Mapa de pendientes elaborado a partir del modelo de elevación digital desarrollado por INEGI a una escala de 1:50,000 y con resolución de 180 X 180 m. La pendiente se expresó en grados y en porcentajes.
3. Mapa de los climas de México, desarrollado por INIFAP (Medina *et al.*, 1998) el cual para su elaboración considera la relación precipitación – evapotranspiración, lo que ayudó a determinar los períodos en que la humedad es deficitaria.
4. Mapa de fases físicoquímicas del suelo, elaborado a partir de información del INEGI, que muestra las principales limitantes físicas de los suelos, como pedregosidad en distintos grados (fase gravosa, fase pedregosa y fase lítica) o presencia de caliche (fase petrocálcica), tepetate (fase dúrica) o yeso (fase petrogypsica). También señala las características químicas del suelo, como áreas salinas, salinosódicas o sódicas.
5. Mapa de uso del suelo desarrollado por la UNAM, usado para delimitar las áreas de uso agrícola y pecuario.

En el Cuadro 5.1 se presenta el diagrama de de decisión para las áreas agrícolas y en el Cuadro 5.2, los criterios de decisión para separar las áreas con actividades pecuarias. Cada diagrama muestra las características propias y ambientales que debe reunir un suelo para pertenecer a las clases de capacidad

seleccionadas. A partir de esto, se identifican los casos que cumplen con las características de cada clase los cuales son después representados en mapas.

Sin embargo, no todos los casos quedan clasificados bajo estos criterios generales, ya que hay combinaciones que quedan fuera de los criterios generales de clasificación. Estos casos fueron asignados a la clase inmediata inferior.

Las unidades taxonómicas que maneja la clasificación FAO-UNESCO permite separar entre ellas al identificar los atributos propios del suelo, como profundidad, presencia de sales o sodio, texturas, cantidad de materia orgánica, etc.

Las fases físico-químicas proporcionan información relevante de los niveles de pedregosidad, presencia de condiciones salinas y sódicas o de yesos, tepetate o caliche, las cuales son limitantes para el desarrollo adecuado de las actividades agrícolas.

En lo que se refiere a las pendientes se consideraron valores menores a 6°. En este caso la metodología del SEMARNAT (2000) utilizó como valores de pendiente de hasta 15° para seleccionar áreas de la clase 1 y 2 de los suelos agrícolas. Sin embargo, aquí se decidió utilizar valores de pendiente menores a 6°.

El mapa de climas utilizado proporciona información sobre la cantidad de agua presente para satisfacer los requerimientos hídricos de los cultivos.

CLASES DE SUELO AGRÍCOLA (Figura 5.1).

Clase 1 (Superficie =145,629 has). Dentro de esta clase se agrupan suelos que tienen propiedades adecuadas para la actividad agrícola intensiva; no muestran ninguna limitante o bien éstas son de poca importancia.

Clase 2 (Superficie =577,164 has). Suelos con alguna o algunas limitaciones menores, que hacen necesaria la aplicación de técnicas para el tratamiento del suelo o del terreno. En general, pueden tener buenos rendimientos.

Clase 3 (Superficie =236,877 has). Suelos que presentan un mayor número de limitantes simultáneas (baja calidad de los suelos, o aridez excesiva, pendientes moderadas, salinidad y/o sodicidad, etc.). Es posible aprovecharlos para la agricultura.

Clase 4 (superficie= 205,018 has). Suelos de muy baja o nula aptitud. Poseen una capa fértil muy delgada, inferior a los 10 cm, o fases líticas, con alta pedregosidad superficial que impide la penetración de raíces al suelo. Pueden tener pendientes superiores a 25°, con gran susceptibilidad a la erosión hídrica.

CLASES DE SUELO PARA USO PECUARIO (Figura 5.2).

Clase 1 (Superficie = 289,454 has). Los suelos de esta clase presentan características que permiten el desarrollo de actividades de pastoreo. Presentan suelos con poca o nula pendiente facilitan el crecimiento de buenos pastos para el ganado.

Clase 2 (Superficie = 1'387,529 has). Suelos que requieren de técnicas de bajo costo para poder llevar a cabo pastoreo o suelos que pueden ser utilizados por cierto tipo de ganado. Requieren de técnicas de manejo de pastizales o rotación de potreros.

Clase 3 (Superficie = 111326 has). Suelos presentan limitantes que obligan al uso de alta tecnología para poder aprovecharlos. Puede haber elevado costo económico y/o en deterioro físico de los suelos.

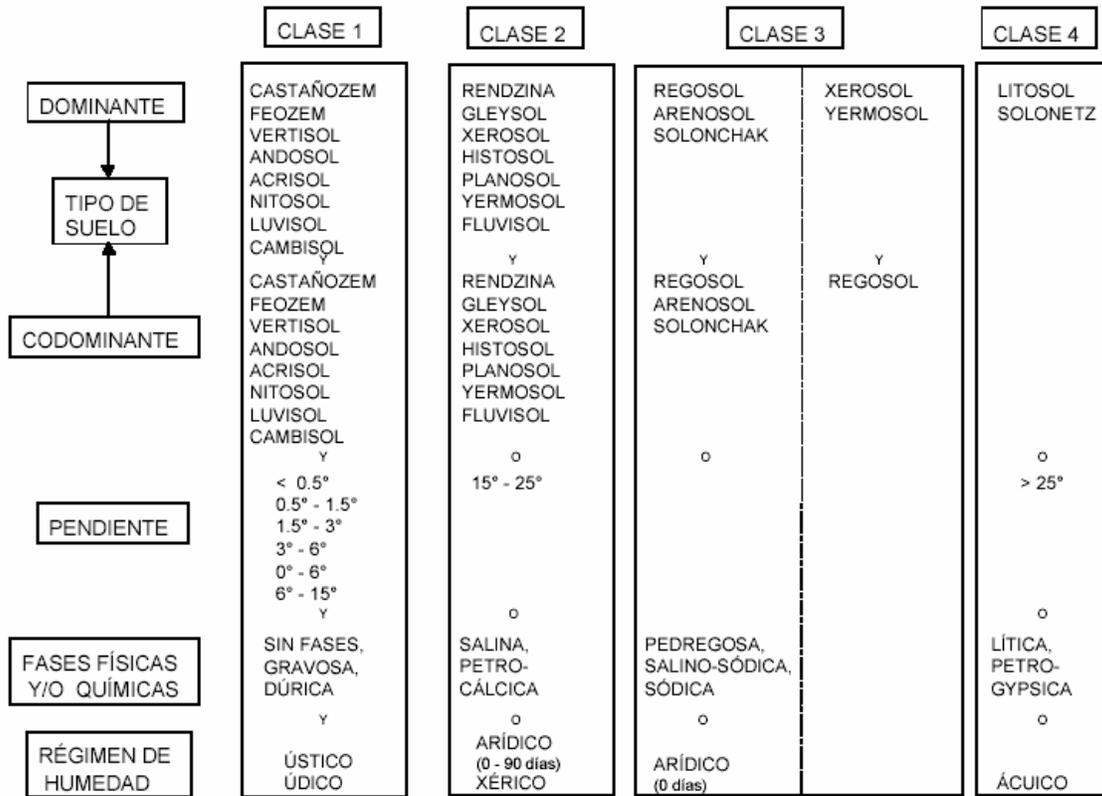
Clase 4 (Superficie = 2'303,955 has). Suelos con características desfavorables para esta actividad.

Cuadro 5.1. Árbol de decisiones para determinar la aptitud de suelos agrícolas.

	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	CLASE 4
DOMINANTE	CASTAÑOZE FEOZE VERTISO	ACRISOL ANDOSO NITOSO CAMBISO XEROSO	PLANOSO REGOSO YERMOSO SOLONET RISTOSO GLEYSO SOLONCHA	LITOSO
TIPO DE SUELO				
CODOMINANTE	Y CASTAÑOZE FEOZE VERTISO	Y ACRISOL ANDOSO NITOSO CAMBISO XEROSO VERTISO FEOZE CASTAÑO	Y PLANOSO REGOSO YERMOSO SOLONET RISTOSO GLEYSO SOLONCHA	Y RENDZIN ARENOSO
PENDIENTE	Y < 0.5° 0.5° - 1.5° 1.5° - 3° 3° - 6° 0° - 6° 6° - 15°	Y < 0.5° 0.5 - 1.5° 1.5° - 3° 3° - 6° 0° - 6° 6° - 15°	Y 15° - 25°	O > 25°
FASES FÍSICAS Y/O QUÍMICAS	Y SIN FASES, GRAVOS	Y SALINA, SÓDICA, DÚRICA, PETRO- CÁLCICA	O PEDREGOS SAL-SOD	O LÍTICA PETRO- GYPSICA
RÉGIMEN DE HUMEDAD	Y ÚSTICO ÚDICO	Y ÚDICO ÚSTICO XÉRICO	O ÁCUICO	Y ARÍDICO

Fuente: SEMARNAT (2000)

Cuadro 5.2. Árbol de decisiones para determinar la aptitud de suelos para actividades pecuarias.



Fuente: SEMARNAT (2000)

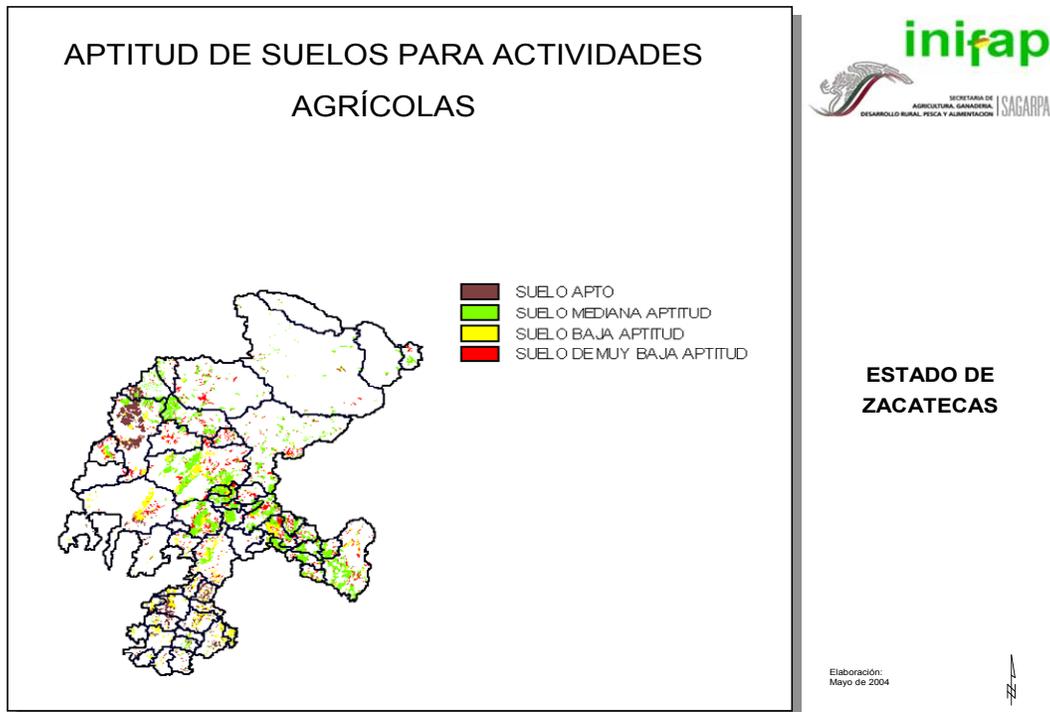


Figura 5.1. Aptitud de suelos Agrícolas

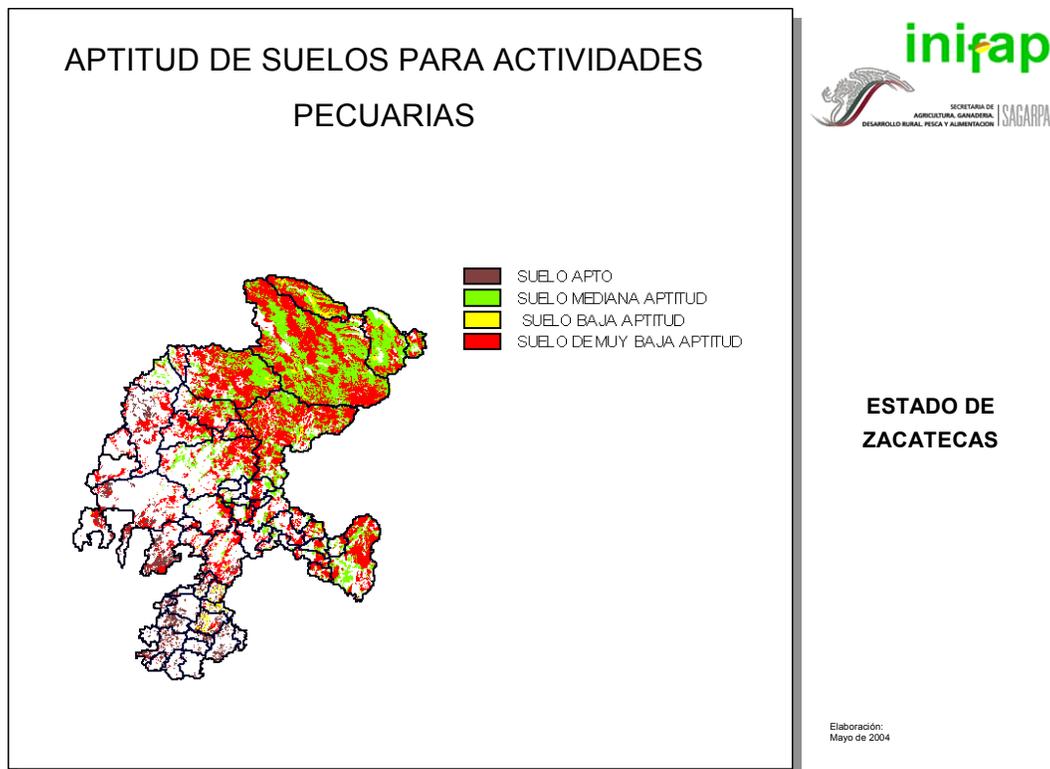


Figura 5.2. Aptitud de suelos para actividades pecuarias.

5.5. PLANEACIÓN DE LAS ACCIONES PARA MITIGAR EL EFECTO DE LA SEQUÍA

La identificación de las áreas de mayor deterioro, así como la clasificación de áreas de acuerdo con su aptitud productiva, son acciones de planeación necesarias para la toma de decisiones de corto, mediano y largo plazo para mitigar los efectos de sequía. Estas acciones son la conversión, la reconversión y la reforestación. La conversión se entiende como el cambio de un cultivo de surcos a uno de amplia cobertura. La reconversión implica el cambio de una actividad agrícola hacia una de tipo pecuario.

Dentro de las acciones de corto plazo, la conversión de zonas de baja aptitud hacia actividades de menor exigencia de inversión, permitirá, dentro del término de un año, favorecer la cubierta vegetal mediante el uso de cereales como la avena, la cebada, etc. Esto permitirá reducir los niveles de erosión y aprovechar al máximo la humedad del suelo. En estas acciones las áreas que deben ser consideradas son las áreas de la clase 2, 3 y las de mayor erosión potencial hídrica y eólica. Estas acciones también son propicias para casos donde los dueños del terreno no están convencidos de un cambio de sistema de producción permanente.

Las acciones de mediano plazo se refieren a aquellas donde la reconversión es la única opción (clase 4 agrícola y clases pecuarias 2,3 y 4). Dado que los cultivos a establecer corresponden a especies de difícil arraigo y lento crecimiento (arbustivas, pastos, nopales, magueyes), deberán considerarse como de impacto a mediano plazo. Estas acciones también consideran la posibilidad de asociaciones de cultivos, las cuales son una reconversión intermedia.

Las acciones a largo plazo son para suelos de cualquier clase e implican la reforestación para levantar barreras rompevientos, áreas forestales y explotaciones no maderables. Su impacto es considerado de largo plazo y planeadas tanto para labores productivas, como ecoturismo, etc.

5.6. COSECHA DE AGUA

Se define a la cosecha de agua, como la captación de agua de lluvia mediante métodos artificiales o alteraciones del terreno con la finalidad de colectarla y almacenarla hasta que sea utilizada (NAS, 1975; Fink et al., 1973). Esta práctica es tan antigua como la humanidad, ya que, se han encontrado vestigios de este tipo de agricultura en diversas zonas desérticas y semi-desérticas del mundo. Por ejemplo, se sabe que desde hace 4000 años se practicaba en el Medio Oriente en zonas en donde la precipitación pluvial apenas alcanzaba un total anual de 100 milímetros (Evenari et al., 1968; Fogel, 1975a). También se han encontrado evidencias de su existencia en América del Sur, Estados Unidos de América y México. En nuestro país, algunas formas de este tipo de agricultura se continuaron utilizando durante la colonia, y aún hoy en día son utilizados con algunas modificaciones en ciertas regiones de los estados de Zacatecas y San Luis Potosí. En este último estado el CREZAS institución dependiente del Colegio de Postgraduados (CP), ha realizado trabajos de

investigación y ha implementado áreas piloto con algunos tipos de aprovechamiento del agua pluvial y de escurrimiento.

Para implementar este tipo de prácticas son necesarios los siguientes elementos (Fogel, 1975a):

- 1) Un suministro de agua, el cual es producido por un área de escurrimiento conocida como área de captación (*Ac*).
- 2) Un sistema de distribución del agua.
- 3) Un sitio en donde el agua se distribuye, que es aquella en donde se desarrollan las plantas cultivadas conocida como área de siembra (*As*).

Es necesario hacer notar que no existe un método o sistema de cosecha de agua en particular que pueda ser adaptado para cumplir todas las necesidades de agua, o que pueda ser construido en cualquier sitio, ya que la variabilidad de climas, suelos, topografía y necesidades hídricas de los cultivos, hace necesario que cada sistema sea diseñado para las condiciones específicas del sitio (Colegio de Postgraduados, 1982).

Previo a la elección y diseño de un sistema de captación de agua de lluvia es necesario realizar un estudio preliminar de la zona para determinar si es necesario su uso, así como si es factible su implementación. Tal estudio involucra a las siguientes variables:

- a) Precipitación: Se requieren conocer los totales de precipitación pluvial diaria, por estación de crecimiento y anual de la zona o zonas adyacentes. Con esta información se realiza un estudio probabilístico para estimar la precipitación esperada a un determinado nivel de probabilidad.
- b) Necesidades hídricas de él, o los cultivos: Es necesario estimar la cantidad de agua que consumirán los cultivos a sembrar, así como su distribución en el tiempo. Para la estimación del agua consumida por las plantas (*ET*) existen varias metodologías que usan información climatológica (Tanner, 1974), sin embargo, también puede ser consultada en los Campos Experimentales del INIFAP en cada zona.
- c) El suelo. Es necesario conocer la profundidad de suelo o textura, ya que existe la posibilidad de que no se promueva el almacenamiento de la humedad y el sistema de cosecha sería inservible.
- d) La topografía. Dependiendo de la forma del terreno y su pendiente, se elegirá aquel con pendientes no muy fuertes, considerando tanto la capacidad de reserva de humedad y estimando la cantidad máxima posible.

Una vez que se cuenta con la información previamente descrita, se realiza un balance hídrico (Tanner, 1974), que es similar al usado en contabilidad (entradas y salidas), y se estima la necesidad o exceso de la humedad. Un ejemplo se muestra en el Cuadro 5.3 para un cultivo de frijol que se pretende sembrar en Julio, bajo condiciones de temporal. La precipitación mensual esperada se estimó a una probabilidad del 50%, y el consumo de agua por el cultivo (*ET*) se estimó

con la ecuación empírica de Blaney-Cridle (1950), (Cuadro 5.3).

Para este caso, en todos los meses se tiene déficit de humedad, acumulando un total de 113 milímetros para la estación de crecimiento, por lo que es necesaria la implementación de un sistema de cosecha de agua. En el caso de que se tenga un exceso de humedad no habría necesidad de establecer un sistema de captación de humedad, sino por el contrario alguna obra de drenaje.

Cuadro 5.3. Balance hídrico para el cultivo de frijol en condiciones de temporal y un 50% de probabilidad de lluvia.

Mes	PP en mm. (P=50%)	ET en mm.	Necesidad o exceso (mm)
Julio	53	93	-40
Agosto	47	97	-50
Septiembre	37	60	-23
Total	137	250	-113

5.6.1. Clasificación de la cosecha de agua

Los métodos de captación de agua de lluvia se pueden clasificar en dos grandes grupos, a saber:

Captación de agua de lluvia "in situ" (en el sitio). Estos métodos se aplican en donde a causa de la fisiografía del sitio no existe la probabilidad de aportaciones horizontales (escurrimiento en arroyos), y por lo tanto sólo se dispone de la precipitación directa (Cluff y Dutt, 1975; Colegio de Postgraduados, 1982).

Sistemas de manejo de escurrimientos. Estas metodologías se aplican en aquellos lugares cercanos a serranías o lomeríos en donde es posible derivar el agua de escurrimiento para irrigar de manera intermitente una superficie sembrada, o bien captar humedad en dicho sitio para sembrar con la humedad residual (Brengele, 1975; Fogel, 1975a).

5.6.1.1. Captación de agua de lluvia "in situ".

Esta técnica o conjunto de técnicas para la captación de humedad han sido ampliamente estudiadas en México, tanto en cultivos de escarda, tupidos y árboles frutales. En todos los casos, el sistema consiste en dedicar una parte del terreno a la captación del agua de lluvia como escurrimiento superficial (A_c), y otra parte del terreno a almacenarla (A_s). Para el diseño de estos sistemas se utiliza la ecuación propuesta por Anaya y colaboradores (1982) que es la siguiente:

$$A_c = A_s + \frac{I}{C} \cdot \left(\frac{ET - P}{P} \cdot A_s \right) \quad (1)$$

En donde, A_c es el tamaño de la microcuenca, A_s es el área de siembra que el agricultor tradicionalmente usa según el cultivo, C es el coeficiente de

escurrimiento, $ET-P$ es el total de las deficiencias mensuales de agua durante el ciclo vegetativo del cultivo y P es el total de lluvia que cae en el tiempo que dura en desarrollo el cultivo.

En el caso de cultivos de escarda (surcos), el método más recomendable es variar el distanciamiento entre hileras, en donde la nueva distancia se estima a partir de la ecuación 1. También es recomendable trazar los surcos siguiendo la curva de nivel (al contorno) para evitar pérdidas por escurrimiento superficial. La distancia entre plantas se conserva de acuerdo con aquella utilizada por el productor. En los cultivos tupidos se construyen bordos siguiendo las curvas de nivel, la distancia entre bordos será igual a la distancia resultante entre la longitud del área de siembra y la del área de captación. La As será un múltiplo del ancho de los implementos a utilizar, y la Ac se estimará considerando As de acuerdo con la ecuación 1 (Colegio de Postgraduados, 1982). En algunos casos es necesario limpiar la superficie del suelo, y emparejar y compactar el Ac para obtener la mayor cantidad de agua de escurrimiento que pueda ser utilizada por el cultivo en la As (Jain y Singh, 1980).

En el caso de árboles frutales el cálculo es similar a los casos anteriores. Sin embargo, es necesario considerar la distancia entre árboles (densidad de plantación) que comúnmente se usa en la zona, y además, usar como una medida de As el área de goteo del árbol. Conocida esta información, así como la precipitación (P), el coeficiente de escurrimiento (C), y el consumo de agua por la planta (ET), se calcula la Ac según la ecuación 1. Al igual que para el caso anterior se hace necesario acondicionar, emparejar y compactar el área de captación, o incluso realizar la aplicación de una sustancia hidrofóbica o repelente al agua (Cluff y Dutt, 1975). La delimitación de las microcuencas se hace mediante bordos de 30 a 40 centímetros de altura, los que cubren los cuatro lados de la microcuenca y contienen a su vez el As . Además, en algunos casos será necesaria la construcción de cepas para la plantación del árbol, la cual será rellena con una mezcla de limo de río, materia orgánica (estiércol o composta) y suelo, cuidando de dejar una pequeña depresión con respecto a la superficie del suelo del área de captación, con la finalidad de facilitar la acumulación e infiltración del agua de escurrimiento (Boers et al., 1986).

5.6.1.2. Sistemas de manejo de escurrimientos

Estos se pueden clasificar en dos grandes grupos (Brengele, 1975; Fogel, 1975a):

Agricultura de Bajíos: En esta variante los productores usan el agua que se acumula en forma natural en las depresiones sin utilizar canales o desviaciones para su control y conducción.

Agricultura de Avenidas: En este caso se utiliza el escurrimiento mediante prácticas hidráulicas diversas para su control, canalización y distribución en la parcela de siembra. Este a su vez se clasifica de la siguiente forma:

Siembra en arroyos intermitentes. En este sistema se controla el escurrimiento

mediante pequeñas presas a lo largo del cauce.

Siembra en los abanicos aluviales usando el agua de cauces intermitentes.

El agua es conducida a la parcela y distribuida en ella mediante represas.

Siembra en terrazas o depresiones usando el agua proveniente del escurrimiento de las laderas o cauces de arroyos intermitentes. El escurrimiento es desviado mediante el uso de estructuras derivadoras y zanjas.

Planeación de los sistemas de manejo de escurrimientos

El proceso de planeación consiste en obtener una caracterización lo más amplia posible del sistema, en donde se deben contemplar como mínimo los siguientes factores (Wood y Richardson, 1975; Colegio de Postgraduados, 1982):

- a) **Físicos:** Suelos (tipos, áreas y características principales); vegetación (tipos, características y usos principales); y cultivos.
- b) **Ecológicos:** Se deben tomar en cuenta los posibles efectos en la ecología del sitio, producto de las obras que se planean realizar, tratando de evitar al máximo los efectos negativos y propiciar la generación de aquellos de influencia positiva.
- c) **Socioeconómicos:** Relaciones entre productores, preferencias, disposición.
- d) **Actividades agrícolas:** Descripción, análisis y discusión de las actividades agrícolas más importantes.

Problemas y necesidades de los productores

Toda esta información es referida a una cuenca hidrológica específica, por lo que esta superficie debe ser delimitada con claridad basándose en las carta topográficas (CETENAL, 1972) de escala 1:50,000, a partir de las cuales se deberá obtener un plano con una escala no menor de 1:5,000 con la finalidad de captar el mayor detalle posible para las obras requeridas.

Algunas consideraciones para el diseño de sistemas de manejo de escurrimientos

La cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde, si fuera impermeable, las gotas de lluvia que caen sobre ella tenderían a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Brooks et al., 1997). Considerando la topografía, la línea que une los puntos más altos de la cuenca y que delimitan su superficie recibe el nombre de parte aguas.

Los parámetros de la cuenca más importantes a considerar en el diseño son (Fogel, 1975b): Área de la cuenca (A); Longitud del cauce principal (LC); Diferencia máxima de desnivel en el cauce principal (H); Pendiente media del cauce principal (H/LC) y; Pendiente media de la cuenca. Los parámetros del suelo en las áreas de captación y almacenamiento son: Textura; Profundidad; Usos del suelo.; Velocidad de infiltración y; Capacidad de almacenamiento de agua. En cuanto a los parámetros relacionados con la precipitación pluvial, los más importantes son: Lluvia máxima de diseño (estudio probabilístico de las precipitaciones máximas ocurridas), la distribución de la precipitación, el total acumulado en el ciclo a una probabilidad del 50% y las curvas de intensidad-duración-período de retorno. A partir de esta información, se proceden a estimar

las variables de flujo que serán indispensables para el diseño de las obras de derivación, conducción y almacenamiento. Las variables de flujo por estimar son el gasto medio diario y anual, y el gasto máximo instantáneo por tormenta y el máximo anual. Esta información será sujeta a un análisis probabilístico con la finalidad de obtener los valores esperados a un cierto nivel de certidumbre, ya que tales datos serán útiles en el diseño de la obra. A continuación se presenta de manera muy breve un método para estimar las variables de flujo.

Estimación del gasto medio y máximo instantáneo por tormenta

Para la estimación del gasto medio (escurrimiento medio), generalmente se recomienda el uso del método del Servicio de Conservación de Suelos de los EUA (SCS, 1972). Este método se basa en la determinación de curvas numéricas a partir de las condiciones hidrológicas de la cuenca y de la humedad antecedente de los cinco días previos a la fecha del evento a considerar en el cálculo (Fogel, 1975b). El escurrimiento se estima a partir de la siguiente relación (Williams et al, 1985; Ponce Y Hawkins, 1996):

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}; \quad \text{si } P > 0.2S \quad (2)$$

En donde, Q es el escurrimiento medio (mm), P es la precipitación (mm) y S es la retención máxima potencial (mm). El parámetro S se estima a partir de las curvas numéricas (CN), las que se eligen tomando en cuenta la cobertura del suelo (determinada por el uso del suelo, el tratamiento o práctica en el mismo y la condición hidrológica) y el tipo de suelo. La expresión para S es:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Los valores de CN se encuentran tabulados en varias obras (SCS, 1972; Fogel, 1975b; Hawkins, 1979; SCS, 1993). Para definir la condición de humedad antecedente (CHA) es necesario llevar un registro de la precipitación ocurrida en los cinco días previos al evento que se pretende estimar, de tal forma que la suma total de dicha precipitación se compara con las categorías del Cuadro 5.4.

Cuadro 5.4. Relación de la precipitación de cinco días previos al evento por estimar y la condición de humedad antecedente (CHA).

CHA	Precipitación, 5 días previos (mm)
I	< 12.7
II	de 12.7 a 38.1
III	> 38.1

Por regla general los valores tabulados de CN corresponden a la CHA II, por lo que es necesario llevarlos a las condiciones correspondientes en caso de ser necesario. Para ello se usan las siguientes relaciones (SCS, 1972):

$$CN_I = -1.0231 + 0.49142 \cdot CN_{II} + 0.00004 \cdot CN_{II}^3 \quad (4)$$

y

$$CN_{III} = 3.28503 + 1.97412 \cdot CN_{II} - 0.01461 \cdot CN_{II}^2 + 0.00004 \cdot CN_{II}^3 \quad (5)$$

Una vez estimado el escurrimiento medio se calcula el escurrimiento máximo instantáneo (q_p), con la siguiente relación:

$$q_p = \frac{0.0021QA}{\frac{D}{2} + 0.6t_c} \quad (6)$$

En donde, q_p es el escurrimiento máximo instantáneo (m^3/seg), Q es el escurrimiento medio (mm) calculado con la ecuación 1, A es el área de la cuenca (ha), D es la duración del exceso de lluvia (hr) y t_c es el tiempo de concentración (hr), el cual se calcula con la relación siguiente:

$$t_c = \frac{0.02 LC^{1.15}}{H^{0.38}} \quad (7)$$

En donde LC es la longitud del cauce principal (m), y H es la diferencia máxima de desnivel en el cauce principal (m). Esta información se estima para varios años y posteriormente se hace un análisis probabilístico para obtener el volumen medio anual a un nivel de probabilidad del 50%, y el gasto máximo instantáneo a diferentes niveles de probabilidad. Esta información será utilizada para el diseño del sistema de captación.

5.6.1.2.1. Ejemplos de sistemas de manejo de escurrimientos

En cuanto a los tipos de sistemas para el aprovechamiento de aguas de escurrimiento se han probado varios diseños a través del mundo, que consisten desde el uso de bordos al contorno (antierosivos) hasta terrazas que requieren de un considerable uso de maquinaria pesada para su construcción. A continuación se presentan brevemente algunos de ellos.

a) Ollas a nivel. Esta estructura se ha construido en áreas de drenaje natural en las grandes planicies centrales de los EUA. Las áreas, que varían desde 1 a 3.5 has se diseñan para captar el escurrimiento proveniente de una cuenca de aproximadamente 200 has. El funcionamiento de este tipo de estructuras es el siguiente. El escurrimiento es derivado hacia la olla mediante una estructura de control (vertedor), y a su vez, este será drenado hacia una olla posterior una vez que el tirante del agua sobre la olla alcance una altura de diseño, que casi siempre es la lámina máxima que puede retener el suelo. La cantidad de agua colectada en las ollas depende del número y magnitud de los eventos de escurrimiento, así como de su posición con respecto a las demás ollas (Brengele, 1975). Su uso se ha promovido para la producción de forrajes que puedan ser usados una vez que se abata la producción de las plantas de pastizal.

b) Derivación alterna del agua. Esta estructura se ha usado ampliamente a través del mundo. De manera general consiste de un sistema derivador principal conformado por una represa y un vertedor que se colocan en el cauce de un arroyo; uno o varios sistemas de conducción compuesto por diques y canales; y un sistema para captar el agua, el cual se divide mediante bordos de tierra, en una o varias áreas en donde crece el cultivo (pequeñas terrazas simples), y donde los excesos de humedad se derivan a las demás áreas, e incluso pueden regresar al cauce del arroyo mediante pequeñas estructuras derivadoras y canales (Fogel, 1975a; Wood y Richardson, 1975). Los sistemas de derivación alterna del agua, conocidos también como sistemas de dispersión de agua, han recibido una especial atención por parte de los profesionales relacionados con la irrigación (Jensen, 1980), de tal forma que existen actualmente algunas clasificaciones de tales sistemas que involucran diseños específicos, según sea el caso. A continuación se presentan brevemente tales sistemas:

b.1. Sistemas de dispersión de agua. Según el Servicio de Conservación de Suelos del USDA, estos sistemas son formas especiales del riego por superficie que consisten en derivar el agua de escurrimiento desde cauces naturales y posteriormente dispersar el flujo hacia áreas relativamente a nivel. La derivación y dispersión se controla mediante un sistema de presas, estructuras, diques, zanjas, o una combinación de ellos, diseñados para condiciones de flujo específicas. Estos sistemas se diseñan por lo general para tormentas de duración de 6 horas y períodos de retorno de 1.25, 2, o 5 años, además pueden ser útiles para controlar el escurrimiento, reducir la erosión y otro tipo de daños al ambiente. Se utilizan principalmente para cultivos forrajeros o praderas, aunque pueden ser usados para el cultivo de leguminosas o básicos, sin embargo, el tipo de cultivo estará en función de la cantidad de agua esperada según el análisis probabilístico de la precipitación, así como del diseño. Se adapta a suelos con texturas de medias a finas y de profundidades medias a altas, con subsuelos medianamente permeables. La topografía del terreno debe ser plana con pendientes ligeras (Fogel, 1975a).

Los diseños de estos tipos de sistemas pueden ser divididos en sistemas del tipo de flujo y sistemas del tipo de detención. Los sistemas del tipo de flujo drenan el agua libremente a través de las áreas irrigadas, mientras que los del tipo de detención retienen el agua aplicada sobre el área irrigada hasta que se infiltre. Algunas formas de estos sistemas se presentan a continuación (Fogel, 1975a; Jensen, 1980):

b.1.1. Sistema de zanjas distribuidoras de flujo. Estos sistemas distribuyen un flujo concentrado de agua en un corto tiempo. Las zanjas se construyen para conducir menos agua que la de la fuente (arroyo), y la pendiente de las mismas son comúnmente reducidas (en incrementos iguales) desde un 0.3% o 0.4% en la parte más alta (a la entrada) hasta

0.0% en la parte final de la misma. El agua de las zanjas distribuidoras de las partes altas es colectada en las zanjas más bajas y re-dirigida lateralmente. Así, aunque el agua fluye solamente en una dirección en la zanja distribuidora, puede fluir en dos direcciones en la zanja de recolección, dependiendo de las condiciones del terreno.

b.1.2. Sistema de distribución lenta del flujo. En este sistema hay una zanja distribuidora simple en la parte más alta del campo o terreno de cultivo, y no existen zanjas de recolección. El agua se derrama lateralmente desde la zanja distribuidora hacia la parte baja del terreno. Conforme el agua fluye pendiente abajo es interceptada por un bordo al contorno que a su vez desvía el flujo hacia la parte baja del campo, en donde existe una estructura de derivación que permite el flujo hacia la siguiente sección del campo de cultivo, en donde nuevamente el agua fluye sobre la superficie y es recolectada por otro bordo al contorno y nuevamente una estructura de derivación permite la salida hacia otra porción del terreno. La operación se repite en la misma forma hasta que se llega a la parte final del terreno de cultivo. La distancia máxima entre los bordos es menor a los 90 m, o bien se puede estimar considerando una altura de 0.2 m de intervalo vertical, y la pendiente natural del terreno.

b.1.3. Sistema de distribución del flujo en bordos y orificios. Este es una modificación del anterior. El agua fluye a través de los bordos hacia las porciones más bajas del terreno a través de tubos o vertederos localizados a intervalos a través de la longitud del bordo. En caso de ser necesario se construye un vertedor de emergencia para derivar los excedentes de agua.

b.1.4. Sistema de detención con control manual de toma. Estos sistemas son útiles cuando se usan flujos de larga estancia tales como el derretimiento de nieves, o flujos permanentes derivados de zonas boscosas. Estos sistemas derivan el flujo hacia cada bordo individualmente hasta que se aplique la lámina deseada. Con una pendiente máxima del 2%, los bordos de 0.6 m de altura y espaciados a intervalos de 30 m permiten un bordo libre de 0.15 m y una lámina aplicada de 0.45 m hacia el bordo inferior, y una aplicación de 0.0 m en el bordo superior. En estos sistemas es necesaria la construcción de estructuras de retención y entrada de flujo con la finalidad de dirigir el agua desde la zanja de suministro hacia cada bordo. En algunos casos se construye además un drene para cada área.

b.1.5. Sistema de detención con control automático de toma. El sistema es básicamente igual al anterior, excepto que las estructuras de control están diseñadas para permitir solamente el flujo hacia las áreas de siembra de una lámina de agua deseada. Mediante un cauce empastado se suministra el agua hacia las zanjas por medio de canaletas o pequeños canales que interceptan una porción del agua.

Hasta aquí se han revisado algunos conceptos que pueden ser útiles para elevar la productividad de los terrenos de temporal, sin embargo, es necesario aclarar que este tipo de tecnologías tal vez no puedan ser utilizadas para todo tipo de terrenos y condiciones

5.7. PRACTICAS VEGETATIVAS

5.7.1. Introducción

Las prácticas vegetativas son aquellas que consideran el desarrollo de plantas o cultivos, con la finalidad de mejorar la capacidad productiva de los terrenos y ayudar a disminuir la erosión del suelo (Figueroa y Morales, 1992).

La forma en que la vegetación impide el efecto erosivo es el siguiente: el follaje de las plantas amortigua la fuerza del impacto de las gotas de lluvia que caen sobre la superficie del suelo y sus raíces sirven para evitar que éste sea arrastrado después del impacto, por el escurrimiento superficial (Kirkby y Morgan, 1980; Figueroa et al., 1991).

Los objetivos que se persiguen con estas prácticas son los siguientes:

- a) Establecer una cubierta vegetal en áreas específicas.
- b) Evitar o disminuir al máximo la erosión eólica y/o hídrica, según las circunstancias.
- c) Lograr una mejor utilización de los terrenos al mejorar sus características físicas y químicas.

Dada la gran diversidad de especies vegetales existentes y las formas en que se manejan, se pueden señalar las prácticas que permitan lograr los objetivos antes señalados. Estas son las siguientes:

- 1) Rotación de cultivos
- 2) Cultivos en fajas
- 3) Reforestaciones

Estas prácticas permiten conservar el suelo y el agua en terrenos que presenten problemas de deficiencias de humedad, erosión, topografía, texturas gruesas o finas y permeabilidades altas o bajas, de tal forma que cada una de ellas puede ayudar a conservar en producción el recurso suelo en forma indefinida.

A continuación se describen las diferentes prácticas vegetativas, se analizan sus objetivos y las maneras de implantarlas en el campo.

5.7.2. Rotación de cultivos

El monocultivo es una práctica arraigada en la agricultura, en cuyo origen coinciden varios factores. El monocultivo incrementa la incidencia de patógenos en el suelo, causantes de enfermedades específicas del cultivo, incrementa la

incidencia de malas hierbas asociadas al cultivo (especificidad) y también es causante de un deterioro de la fertilidad de los suelos, en elementos específicos.

En la región Norte Centro del INIFAP, que abarca los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y La Comarca Lagunera, existe la oportunidad de poder llevar a cabo la rotación de cultivos bajo riego y temporal entre especies de leguminosas (principalmente frijol, garbanzo porquero y tréboles anuales entre otros) y gramíneas como el maíz, trigo, avena, triticales y cebada, lo cual redundaría en grandes beneficios a los sistemas agrícolas de la región. Dicha práctica ayuda en el control de la erosión, principalmente por la mejora en la cobertura del suelo.

Rotación es la sucesión de cultivos diferentes en ciclos continuos sobre un área de terreno determinada (Foster, 1964). La serie o secuencia de cultivos que constituirá un ciclo de rotación debe programarse con base en las condiciones ecológicas y económicas de la región.

El ciclo de la rotación debe ser mayor cuando el problema de erosión o baja fertilidad de los suelos se incrementa y siempre es conveniente incluir, al menos, una leguminosa dentro de la misma.

Una rotación bien planeada, tiene las siguientes ventajas en relación con un sistema simple de monocultivo (Gavande, 1979):

- a) Mejora o mantiene la fertilidad de los suelos.
- b) Previene la incidencia de plagas, malezas y enfermedades.
- c) Controla la erosión del suelo
- d) Asegura un programa balanceado de trabajo en áreas de riego y en las de temporal mantiene cubierto el suelo.
- e) Previene o limita los períodos críticos de requerimientos de agua de riego.
- f) Conserva la humedad del suelo, de una estación a la siguiente.

Los principios agronómicos que rigen normalmente la rotación de cultivos son:

- a) Crecimiento alternado de cultivos con sistemas radicales que se desarrollen a diferentes profundidades.
- b) Alternar cultivos susceptibles a ciertas enfermedades con aquellos que son resistentes.
- c) Alternar cultivos agotadores de suelo con aquellos que contribuyen al mejoramiento de la fertilidad.
- d) Sistematizar la explotación de la tierra, de acuerdo con los recursos y posibilidades de mercadeo de la zona, que permita un incremento de los ingresos.
- e) Alternar cultivos con diferentes requerimientos críticos de labranza, agua, mano de obra, etc., adaptándolos a las disponibilidades de la zona.

La rotación de cultivos se recomienda para terrenos de las clases 2, 3 y 4, que presentan problemas o factores de demérito como: deficiencia de humedad, erosión, topografía, texturas gruesas o finas y permeabilidades bajas o altas. Esta práctica es conveniente también en terrenos de primera clase, que no presentan factores limitantes.

5.7.3. Cultivo en fajas

El cultivo en fajas es un sistema utilizado en la conservación de suelos que consiste en cultivar los terrenos de pendiente del 2 al 15% en fajas alternas y de anchura variable, con plantas de escarda (en surcos) y cultivos tupidos, los cuales generalmente siguen un programa o secuela de rotación (Foster, 1964).

Esta práctica vegetativa ofrece las siguientes ventajas:

- a) Protege a los terrenos de la erosión, ya que en las fajas donde se desarrollan cultivos tupidos, disminuye el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, aumenta la oportunidad de infiltración del agua y reducen los volúmenes de escurrimiento, de tal manera que disminuye la erosión de esa faja y atenúa el efecto que el escurrimiento produce en las fajas con cultivos de escarda.
- b) Evita hasta en un 80% la erosión de los terrenos de pendiente moderada, y cuando se combinan con algún tipo de terrazas, puede reducirla hasta en un 90%.
- c) Permite aprovechar eficientemente los terrenos de las clases 2, 3 y 4, donde la pendiente puede llegar hasta un 15%.

Entre las prácticas agronómicas más convenientes se pueden citar las siguientes:

1° Una faja de cultivo en surcos, o de escarda, debe seguir invariablemente a otra con cultivo tupido. La selección de ambos cultivos dependerá de la planeación adoptada para el uso eficiente del suelo, las condiciones ecológicas y los aspectos socio-económicos.

2° Para zonas de alta precipitación, es recomendable establecer en la parte más alta del terreno el cultivo de escarda, y en seguida el cultivo tupido. Lo anterior se debe a que en las primeras etapas de desarrollo, las fajas con cultivo de escarda en contorno, retienen mejor el agua en los surcos y presentan menor oportunidad para que el suelo se erosione.

5.7.4. Reforestación

Reforestación es la reposición natural o artificial de la vegetación arbórea que existió en un área determinada (Young, 1982); debe constituir una práctica general en todas las regiones de nuestro país, ya que la deforestación ha causado grandes pérdidas de suelo por erosión.

Cuando una unidad forestal se está aprovechando técnicamente, lo normal es que este ocurriendo siempre una reforestación natural.

Las diversas causas de disturbio con factores de destrucción de renuevos que evitan la reforestación natural crean la necesidad de reforestar o plantar árboles de las especies forestales que estén bien adaptadas a la zona de interés.

Las principales causas de disturbio son la explotación irracional de los bosques y los incendios. Como causas de disturbio secundarias tenemos, entre otras, el tránsito para sacar productos, el sobrepastoreo con ovejas y cabras que consumen plantas tiernas.

5.7.4.1. Plantaciones

Las plantaciones forestales son un cultivo permanente, tienen varias finalidades simultáneas, como son la recuperación y conservación del suelo, mantenimiento de las cuencas hidrológicas y de los mantos freáticos, establecimiento de cubierta vegetal (Young, 1982; Brooks et al., 1997), lo que origina la formación de microclimas, así como sombra para la fauna silvestre o de animales domésticos, independientemente de la utilidad económica que puedan reportar las especies forestales a los campesinos que habitan en las zonas áridas del país, superficie mayor al 40% del área total del territorio nacional. Para lograr el establecimiento de especies forestales arbóreas en estas zonas, es esencial la retención al máximo de la humedad de la precipitación pluvial a través de técnicas adecuadas, ya que esta precipitación es escasa y errática. Entre estas técnicas se pueden mencionar construcción de zanjas, bordos a nivel para retención de escurrimientos, terrazas y sistemas de plantación más avanzados como son el Gradoni, el Sistema Español, el subsoleo, etc. Se diseñaron también diferentes tipos de “trampas de agua” que llevan el nombre de “Gradoni modificado”, “Sauceda 1” y “Sauceda 2”, los cuales se describen a continuación:

a) Trampa de agua Gradoni Modificado. Este sistema posee las mismas características del gradoni común; la modificación fue la de formar un talud aguas arriba de la propia zanja con una inclinación de 35° hacia el sistema radicular de la planta, con el propósito de tener el agua captada lo más cercana a las raíces, así como para evitar el derrumbamiento de esa pared, ya que como se ha dicho con anterioridad, las precipitaciones en zonas áridas son escasas y erráticas; además, es común que estas se presenten en forma torrencial; así mismo, este sistema de trampa de agua, se estableció en microcuencas probando diferentes relaciones área plantación- área escurrimiento.

b) Trampa de agua Sauceda 1. Este sistema de trampa de agua se inició con el trazo de una curva a nivel, para que los escurrimientos fueran homogéneos; en esta curva a nivel, se localizan los puntos de equidistancia de las especies forestales a establecer; esta distancia no debe ser menor de tres metros entre plantas, ya que por la escasez de la precipitación pluvial y deficiencia de los elementos nutritivos en el suelo, pueden existir fallas considerables por esos conceptos. Una vez localizados los puntos de equidistancias, se realiza la plantación en una cepa común; a 20 cm a ambos lados del arbolito y en dirección paralela a la curva, se hacen excavaciones de 60 X 60 X 40 cm, formando un talud

de 35° con pendientes hacia el sistema radical de la planta. Este sistema tiene la ventaja de almacenar cantidades considerables de agua, ya que debido a su diseño, la humedad fácilmente llega por capilaridad hacia las raíces.

También es un sistema fácil de realizar debido a las características físicas de los suelos de zonas áridas. Este método garantiza el establecimiento de la especie, aunque posteriormente y por efecto de las precipitaciones torrenciales, es posible que estas trampas puedan llegar a enzolverse, pero para ese entonces la planta ya ha formado un sistema radical fuerte y profundo, por lo que es difícil que este enzolamiento influya en forma significativa en el buen desarrollo de la especie.

c) Trampa de agua Saucedá 2. Esta trampa de agua se diseñó tomando en cuenta la textura y estructura de los suelos característicos de esta zona dándole una forma semicircular; con esta forma se pretende establecer comparaciones de efectividad de captación de agua de escurrimiento con las dos trampas de agua descritas con anterioridad, las cuales tienen una formación angular. La ejecución de dicha trampa se realizó, al igual que en Saucedá 1, sobre el trazo de una curva a nivel y se procedió también a marcar los puntos equidistantes a que van colocadas las plantas, siendo la equidistancia mínima de tres metros; tomando como centro estos puntos, se trazó un semicírculo con un radio de 30 cm (radio 1), en seguida se trazó otro semicírculo de 70 cm de radio (radio 2); la excavación se llevó a cabo en el espacio comprendido entre la diferencia del radio uno y dos, con una profundidad de 40 cm.

Otros métodos que permiten el establecimiento de plantaciones son la utilización Microtrampas para captación de agua de escurrimiento para el desarrollo de diferentes especies entre otros, *Pinus halepensis*, especies frutícolas, *eucalyptus sp.*,

Se ha probado el trazo de curvas a nivel con diferentes relaciones área siembra - área escurrimiento para el establecimiento de especies forrajeras para el mejoramiento de agostaderos como son *Atriplex canescens*, *Atriplex nummularia*, *Acacia berlandieri*, *Dalea tuberculata*, pastos nativos e introducidos como son *Bouteloua curtipendula*, *Cenchrus ciliaris*, *Sorghum almum*, *Panicum antidotale*, *Chloris gayana*.

Dentro de Campo Experimental Forestal la Ventana en La Laguna, se realizaron algunos trabajos de investigación para definir desde las formas de reproducción de diversas especies, entre otras, *Atriplex*, Orégano, Jjoba, así como la época, método y densidades de plantación.

Se determinó una densidad de plantación para el orégano bajo condiciones de temporal de 1.0 X 1.0 m es decir un metro entre plantas y un metro entre hileras, lo que nos arroja una densidad de plantación de 10,000 plantas por hectárea, siendo la época de plantación más adecuada al inicio de la temporada de lluvias, previa preparación de cepas. Para plantaciones bajo condiciones de

riego se determinó una densidad de plantación de 0.50 X 1.0 m, es decir, cincuenta centímetros entre plantas y un metro entre hileras obteniendo un densidad de plantación de 20,000 y la época de plantación durante marzo a octubre. Bajo el esquema de riego es factible obtener tres cortes en el mismo año de plantación; sin embargo, es a partir del segundo corte cuando se podrá obtener un rendimiento potencial de 3,300 kg de hoja seca /ha /corte.

5.8. SISTEMAS DE PRODUCCIÓN INTEGRAL

Dado el carácter aleatorio en tiempo y en espacio de la precipitación, en la mayoría de los ambientes clasificados como de humedad limitativa, es necesario optar por estrategias múltiples, ya que las estrategias edáficas y genéticas no funcionarían debido a la falta de precipitación en algunos años.

Este concepto está basado en el hecho de que en la mayor parte de los sistemas tradicionales de explotación de recursos, en la región norte-centro, se da el uso múltiple de recursos naturales como una estrategia de sobrevivencia, realizando el productor actividades de producción de cosechas, producción animal, recolección de plantas nativas y uso de fauna silvestre dentro de su sistema de producción.

La explotación integral consiste entonces en reforzar las otras actividades productivas de los agricultores para que éstas se constituyan en la fuente de satisfactores, en lugar de las cosechas no obtenidas en los años de precipitación mala; de hecho, los productores siguen este esquema en forma exitosa en muchas partes de la región norte-centro de México.

Dentro de las actividades realizadas para sobrellevar los eventos extremos de sequía, también se encuentra el trabajo extra finca y la migración temporal o permanente a las grandes ciudades o al extranjero.

En los sistemas de producción integral se busca reforzar las actividades que realiza el productor considerándolas como un todo; por esta razón, en cualquier modificación de la tecnología prevaleciente se debe considerar el efecto que tendrá en los otros procesos de producción que está realizando el productor, incluyendo el trabajo extrafinca.

En la consecuencia de esta última estrategia, las estrategias edáficas y genéticas se convierten en auxiliares de la global, es decir, son un medio y no un fin en el combate a la sequía. La naturaleza misma de esta acción obliga a la interdisciplinabilidad y por lo mismo, a la integración de grupos multidisciplinarios que comprenden todas las ciencias involucradas en la solución del problema. Para que la estrategia sea exitosa, se requiere de un análisis previo de las condiciones socioeconómicas de los productores con miras a una tipificación de los mismos, a fin de ubicarlos geográficamente en el área de estudio.

A manera de ejemplo, se pueden mencionar los siguientes:

a) Mejoramiento de los Sistemas de producción para una Agricultura Sostenible y de Conservación de los Recursos. Esta tecnología fue generada por el INIFAP, en el estado de Aguascalientes, la cual consiste en integrar una serie de componentes tecnológicos tales como: labranza de conservación, captación de agua *in situ*, surcado al contorno, cultivos poliespecíficos (cultivos diversos anuales y perennes) rotación de cultivos (leguminosas), barreras vegetales (nopal y mezquite), Uso de biofertilizantes y fertilización foliar (Urea al 2% + ácido fosfórico), el reciclaje de nutrientes y la utilización de los esquilmos agrícolas en la engorda de ganado menor, todos ellos como componentes de una agricultura sostenible.

Estos componentes tecnológicos integrados a los sistemas de producción regional brindan la posibilidad de reducir tanto los costos de producción hasta en un 40%, como la erosión a valores permisibles e incrementar la productividad en un 60% y contribuir a conservar los recursos naturales.

b) Sistema de producción sostenible de rotación y asociación de cultivos de otoño-invierno y primavera-verano bajo labranza de conservación. Esta tecnología fue generada para condiciones de riego, por el INIFAP en el estado de Aguascalientes, la cual consiste en establecer sistemas de rotación y/o asociación de cultivos de cobertura (leguminosas y gramíneas forrajeras anuales) en otoño-invierno y cultivos alternados (cuatro surcos de maíz con fajas de trébol alejandrino "Var. Berseem Clover" *trifolium alexandrinum* L.) para la producción de forraje y el reciclamiento de nutrientes (fijación biológica de nitrógeno de la leguminosa y el manejo de residuos vegetales), todos ellos manejados bajo labranza de conservación.

5.9. ESTABLECIMIENTO DE PRADERAS DE ZACATE BUFFEL

5.9.1. Introducción

Del total de la superficie de la Comarca Lagunera (4'788,750 hectáreas) aproximadamente el 94% (4'514,147 hectáreas) corresponde a una superficie de uso múltiple (Pecuario y/o Forestal), también consideradas como áreas marginadas, en donde se desarrollan actividades muy importantes de ganadería bajo condiciones de libre pastoreo, en donde debido al mal manejo de los agostaderos a propiciado el sobrepastoreo, alcanzando coeficientes de agostadero de hasta 35 hectáreas por unidad animal. Esta misma superficie es también empleada en la recolección de especies forestales no maderables, siendo las más importantes la candelilla, el orégano y el sotol. Así mismo, se explotan especies forestales maderables, donde destaca por su importancia social y económica el mesquite como leña y su transformación en carbón.

En la superficie de uso múltiple, conformada por zonas áridas y semiáridas, desde hace tiempo la producción pecuaria se encuentra muy por debajo de su

potencial y en algunos lugares muchas veces es nula, donde la recuperación de los agostaderos solo es posible mediante la siembra de pastos.

La resiembra o siembra de pastizales constituye una de las prácticas de mejoramiento de pastizales más importantes y se define como el proceso de establecer vegetación por medio de la diseminación artificial de semilla de especies adaptadas, utilizando técnicas adecuadas. Sin embargo, también considera la diseminación natural, como resiembra de pastizales, utilizando técnicas de manejo tales como, carga animal adecuada, nivel de utilización apropiado, descansado de los potreros, rotación de potreros, distribución del pastoreo y combate de arbustivas indeseables. Esto sin duda, tiene el mismo objetivo, solo que por diferentes medios y a más largo plazo, ya que la resiembra artificial efectúa la propagación por medios mecánicos, que son más costosos y tienen más riesgos que la resiembra natural (INIP, 1980).

La repoblación de áreas de pastizal degradadas debe realizarse con especies que además de ser adaptadas o adaptables deben presentar una facilidad de establecimiento, ser agresivas, resistir el pastoreo, de alto valor nutricional y ser palatables. La mayoría de las características deseables en la selección de especies las reúne el Zacate Buffel, el cual es originario de África Ecuatorial, India e Indonesia y fue introducido a México en 1954.

La resiembra de pastizales es una práctica que data de fines del siglo XIX en los Estados Unidos (Smit, 1895) y de mediados del siglo pasado en México. La resiembra de pastizales, se hace necesaria al desaparecer el potencial forrajero de un área, con los subsecuentes problemas de degradación de la misma, como son erosión, baja productividad y miseria. En nuestro País, la utilización de los pastizales data del siglo XVI, con la introducción del ganado doméstico por los conquistadores españoles, estableciéndose los primeros hatos y rebaños en la región del Valle de México, los cuales fueron multiplicándose a lo que hoy es Querétaro y la Región del Bajío; posteriormente, a lo que ahora es el norte de México (Brand, 1967).

Las crónicas y datos de la conquista de México y las subsecuentes, señalan cantidades formidables de ganado que pastoreaba en la Nueva España, posteriormente México (Barlett, 1854; Bancroft, 1884). Esto fue debido a lo extenso y productivo de los pastizales encontrados por los europeos, más debido al abuso de los recursos, se provoca el desbalance ecológico de estas tierras, que se ha propiciado a lo largo de las diferentes épocas de nuestra historia, hasta la fecha, donde aún persiste el sobrepastoreo, causa principal del deterioro de los pastizales, el cual tiene una influencia directa en la pobre condición y bajo rendimiento de los animales que los utilizan, pues provoca que las especies forrajeras deseables desaparezcan y sean sustituidas por arbustivas indeseables y plantas tóxicas. Otra de las causas principales de la degradación y baja productividad de los pastizales de México, es sin duda una política agraria errónea, ya que en nuestro país la falta de conocimiento y criterio con respecto a

lo que son los pastizales nativos y como deben ser utilizados ha causado tremendos daños a la ecología y a la economía del País.

Cantú (1984), mencionando a otros autores, resalta que los pastizales degradados pueden rehabilitarse mediante las siembras natural y artificial. Esta última se aplica a pastizales completamente degradados donde el solo manejo de una sucesión secundaria resultaría casi imposible para mejorar la condición del pastizal ya que requeriría de demasiado tiempo.

Este mismo autor considera que la siembra de pastizales se define como la diseminación de la semilla para establecer una vegetación de especies adaptadas al pastizal de una manera artificial, mientras que la resiembra de pastizales, se define como la aplicación de la siembra de pastizal a un área previamente sembrada, generalmente debido al fracaso de una siembra anterior. La resiembra de pastizales en su concepción más amplia constituye el proceso de establecer una comunidad de plantas por medio de la diseminación de semillas en una cama de siembra preparada para tal propósito, el objetivo principal de la resiembra artificial es proveer una cubierta vegetal de especies forrajeras en pastizales que originalmente presentan cantidades insuficientes de especies forrajeras deseables, y que sean de difícil recuperación por medio de prácticas de manejo dentro de un plazo razonable.

La siembra natural es la propagación de plantas nuevas por procesos naturales; se lleva a cabo mediante el uso de técnicas de manejo tales como: pastoreo adecuado, descanso, rotación, carga animal determinada, combate de arbustos y distribución apropiada del ganado.

5.9.2. Investigación

A partir de la creación del Campo Experimental Forestal “La Ventana”, en el año de 1976, se inició el establecimiento de trabajos de investigación con zacate buffel y otras gramíneas.

a) Parcelas de introducción de tres especies de gramíneas:

Con base en resultados obtenidos en el Campo Experimental Forestal “La Saucedá”, se seleccionaron el Buffel, el Sorgo Almum y el Rhodes, con densidades de siembra 12, 18, y 8 kg/ha, respectivamente.

El terreno donde se realizó la siembra fue una cuenca cerrada en las estribaciones de la Sierra de Jimulco, efectuando el desmonte, barbecho y rastreo, procediendo posteriormente a la siembra la cual se llevó a cabo al voleo y tapada con una rastra de ramas. Durante el primer año, el porcentaje de germinación en Buffel fue del 60%, el Almum del 30% y el Rhodes solamente el 26%. Para el segundo año el Rhodes desapareció y el Buffel empezaba a invadir las parcelas de sorgo Almum. Para el tercer año, el Buffel cubría todas las parcelas.

La producción de Rhodes y Sorgo Almum durante los tres primeros años fue mínima y solamente el Buffel produjo un rendimiento medio de 7.5 toneladas de materia seca por hectárea.

b) Alternativas de uso de una pradera de zacate Buffel

Una vez establecida la pradera de Buffel, se procedió a establecer como alternativa de uso el pastoreo directo, corte y quema del follaje.

El objetivo de este trabajo consistió en evaluar la recuperación del pasto después de la aplicación de los tratamientos. El pastoreo se llevó a cabo con vacas criollas de la región, previa obtención de la capacidad de carga animal, aprovechando el 60%, para el resto dejarlo para la recuperación. El corte se efectuó con rozadera aprovechando también el 60%, y la quema fue total después de la recuperación de la semilla. La recuperación fue total y más rápida en el pastoreo, tal vez debido a la salivación del ganado y además la pradera no se vio afectada por el pisoteo del ganado. Mediante la aplicación de la quema, la brotación se inició rápidamente pero el desarrollo posterior fue lento. Al aplicar el corte del forraje, la recuperación fue muy lenta y la producción se retardó más de un mes en comparación con el pastoreo directo.

c) Relaciones Área Siembra – Área Escurrimiento y Densidades de Siembra para el Establecimiento de Zacate Buffel bajo Condiciones de Secano

Este trabajo se estableció en terrenos del Ejido Zapioris, Municipio de Lerdo, Estado de Durango, aplicando los siguientes tratamientos:

1:0 Que indica un desmonte total entre bordo y bordo.

1:1 Indica que entre bordo y bordo el desmonte se realiza en el 50%, dejando el otro 50% intacto con la vegetación nativa para que sirva como área de escurrimiento y protección contra la erosión.

1:2 Esta relación indica que de la superficie entre bordo y bordo se desmonta una tercera parte y el área restante queda intacta.

1:3 Que indica que se desmonta un 25% de la superficie.

El terreno seleccionado se desmontó, se barbecho, se rastreó y se realizó la siembra, tapándola con una rastra de ramas. La siembra se llevó a cabo antes de la época de lluvias durante el mes de junio. Se obtuvo la pendiente media del terreno, y con la aplicación de la fórmula del intervalo vertical se trazaron las curvas de nivel sobre las cuales se levantaron los bordos con una bordeadora agrícola. El tratamiento sobresaliente fue el empleo de la relación Área Siembra – Área Escurrimiento de 1:2.

d) Establecimiento de Zacate Buffel en Curvas de Nivel

Para el desarrollo de este trabajo se escogió la relación Área Siembra – Área Escurrimiento de 1:2. Esta investigación fue establecida en 1984 y se evaluó por dos años obteniendo un rendimiento medio de 5.7 toneladas por hectárea. Para el tercer año, la cobertura se incrementó considerablemente empezando a invadir el bordo y aguas abajo de éste, lo que aumenta la productividad del área

de escurrimiento y en la cual no se aplicó trabajo alguno ni se ha tomado en cuenta para determinar el coeficiente de agostadero.

e) Producción de Zacate Buffel en diferentes condiciones del pastizal

Se llevó a cabo una evaluación para determinar la producción de Zacate Buffel en áreas previamente sembradas, en tres condiciones diferentes dentro de un pastizal sobrepastoreado, con un coeficiente de 35 hectáreas por unidad animal. La primera condición fue en una cuenca cerrada al pie de un cerro; la segunda en un terreno abierto con una pendiente aproximadamente del 5%, sembrando una tercera parte entre curvas; la tercera también en un terreno abierto, pero con pendiente del 1 al 2% y sembrando toda el área.

Aunque no hubo diferencia en rendimiento entre las tres condiciones, debido a la mayor acumulación de humedad en la cuenca cerrada, la brotación y la producción se presenta antes, con la desventaja de que, debido a la mayor cantidad de agua, el suelo se compacta y es necesario realizar trabajos culturales, en este caso rastreo superficial, y adicionar estiércol como materia orgánica para evitar la compactación del suelo. Dichas actividades se deben llevar a cabo cada 3 o 4 años dependiendo del suelo.

5.10. PRÁCTICAS DE LABRANZA EN EL MAIZ Y FRIJOL DE TEMPORAL

En el sistema de labranza de conservación, el suelo se prepara al mínimo sólo para enterrar la semilla, los residuos vegetales no se incorporan y quedan sobre la superficie, cubriendo el suelo con un mantillo. Los residuos vegetales cubren el suelo disminuyendo la insolación, el impacto de la lluvia, la evaporación y el encostramiento. La cantidad mínima de superficie que debe estar cubierta es de 30 % para lograr disminuir aproximadamente un 50 % de la erosión con relación a un suelo sin cubierta.



5.10.1. Labranza mínima

En este sistema de labranza, se **elimina el barbecho** substituyéndolo por un paso de cincel o subsuelo, en los terrenos compactados que lo requieran. En suelos francos se puede omitir esta labor e iniciar con una rastra pesada



previa a la siembra, y posteriormente las labores culturales normales, incluyendo el pileteo. Al final del ciclo, se incorporan **los residuos** de la cosecha mediante un paso de rastra o **se dejan sobre la superficie como mantillo**.

5.10.2. Pileteo

La captación del agua de lluvia es una labor que permite reducir los riesgos de sequía en los cultivos y erosión del suelo; además, promueve el desarrollo de la cubierta vegetal y mejora el rendimiento de los cultivos.

El pileteo se utiliza en cultivos de hilera y consiste en levantar pequeños bordos de tierra a distancias regulares a lo largo del surco, mediante un implemento denominado pileteadora.

La pileteadora INIFAP es un implemento de diseño fácil, económico y se ajusta al equipo y sistema tradicional de los productores. El pileteo se aplica simultáneamente con las labores de escarda, utilizando la barra portaherramientas. Así, mientras más oportunamente se haga, habrá más probabilidades de captar los eventos de lluvia fuertes. Si las piletas están bien conformadas, estas tendrán la capacidad de captar eventos de lluvia de hasta 50 milímetros.

El efecto del pileteo en el incremento en rendimiento de frijol ha sido favorable; cuando el pileteo se efectúa oportunamente, el aumento en rendimiento es de 29 %. En parcelas de productores con una precipitación menor de 300 milímetros durante el ciclo agrícola, el rendimiento promedio de frijol sin piletas es de 346 kg/ha, y con pileteo se aumentó a 514 kg/ha, es decir, hubo un incremento promedio del 48 %. Esta tecnología es aplicable en 285,000 ha que se siembran con frijol en los llanos de Durango.



El pileteo, además de captar agua de lluvia en beneficio del cultivo, permite conservar el suelo al evitar la erosión. Su costo es bajo y se compensa ampliamente con el incremento en rendimiento y disminución del riesgo de sequía.

5.10.3. Labranza de conservación

La labranza de conservación permite un ahorro en los costos de producción, haciendo más rentable la agricultura. En Durango, donde los costos de producción para los cultivos de frijol y maíz con labranza convencional y bajo el sistema de temporal son del orden de 2503 y 2488 pesos por hectárea, respectivamente; en comparación con los costos estimados para la labranza de conservación (2003 y 1738 pesos), tenemos un ahorro de un 20 a 30 por ciento. (Cuadro 5.5).

Cuadro 5.5. Costos de producción para la labranza tradicional y de conservación en Durango.

CONCEPTO	FRIJOL		MAÍZ	
	LT	LC	LT	LC
Preparación del terreno	500	0	750	0
Siembra	490	490	355	355
Fertilización	238	238	282	282
Control de malezas	350	350	611	611
Control de plagas y enfermedades	275	275	120	120
Cosecha	650	650	370	370
Total	2503	2003	2488	1738

LT= Labranza Tradicional, LC= Labranza de Conservación
 Costos Proporcionados por la SAGAR-Durango.

Las ventajas de la labranza de conservación se anotan a continuación:

- a). **Disminución del escurrimiento.** Permite conservar un 20 por ciento más de agua en el suelo en comparación con la labranza convencional.
- b). **Reducción de los costos de cultivo.** Permite un ahorro del 20 al 30 por ciento del costo del cultivo.
- c). **Disminución de la pérdida de suelo.** Disminuye la erosión en un 70 por ciento aproximadamente con relación a un suelo sin cubierta.

En forma general son más las ventajas que las desventajas, pues las mayores dificultades se presentan sólo al iniciar con este sistema. Las desventajas se agrupan como:

- a). **El sistema requiere de varios ciclos de cultivo.** Para llegar a una estabilización de la estructura del suelo, se requiere por lo menos de 4 a 5 ciclos de cultivo consecutivos, durante los cuales el productor no detecta las bondades del sistema, lo que desanima a la mayoría de estos.

b). Dinámica y control de malezas. Los resultados experimentales indican que en los sistemas de labranza de conservación se reduce el número de especies de maleza presentes en el terreno; por ejemplo, con el uso repetido de atrazina ó 2,4-D en maíz ocasiona un cambio en la composición de la malezas, reduciendo la presencia de especies de hoja ancha y favoreciendo el incremento de las gramíneas anuales y perennes.

c). Dinámica de plagas y enfermedades. Los efectos de la labranza de conservación sobre la presencia de plagas y enfermedades pueden ser muy variados, dependiendo del tipo de plaga y enfermedad endémica de la región. En algunas localidades del centro de México se ha registrado un incremento de las poblaciones de plagas rizófagas en sistemas de labranza de conservación, como la gallina ciega y el gusano de alambre.

Perspectivas de la Labranza de Conservación en el Estado de Durango

Si se solucionan las limitantes que se presentan en el inicio de la implementación de un programa de labranza de conservación, el éxito está asegurado (disponibilidad de maquinaria especializada, herbicidas requeridos para los cultivos locales, capacitación de técnicos y productores, financiamiento para la maquinaria requerida, etc.). El éxito que tengan los primeros productores que adopten este sistema funcionará como detonante para que muchos productores determinen adoptar este sistema. Si los Gobiernos, previamente convencidos de las bondades de este sistema, se deciden a canalizar los apoyos gubernamentales necesarios vía Alianza para el Campo, a los productores que decidan adoptar este sistema, la labranza de conservación en el Estado será todo un éxito.

Tipo de Productores Participantes

Existe mucha desconfianza y desinterés por parte de los productores con la labranza de conservación. Hay un dicho muy conocido entre ellos que dice “El que no barbecha no cosecha”. Por tal motivo, el convencimiento de los productores es una tarea bastante difícil, la cual sólo será superada con mucha labor de convencimiento basada en cursos de capacitación y demostraciones de campo sobre las bondades de este nuevo sistema de producción. Es muy importante detectar en cada zona a los productores líderes que están dispuestos a incursionar en nuevas prácticas de cultivo. Estos cuentan con mayor poder de convencimiento sobre los productores vecinos.

El productor susceptible de participar en este programa deberá ser innovador y cubrir los siguientes requisitos:

- a) Contar por lo menos con una superficie de 10 ha de terreno de cultivo propio.
- b) Tener solvencia económica para poder acceder a créditos refaccionarios para la adquisición de la maquinaria agrícola especializada.
- c) Estar dispuesto a cambiar su sistema de labranza convencional por labranza de conservación.
- d) Estar dispuesto a seguir con el sistema de labranza de conservación durante los años subsecuentes.

- e) Mostrar disponibilidad para la capacitación en el manejo del nuevo sistema de producción.
- f) Aceptar que su predio pueda ser usado en eventos demostrativos y de días de campo.
- g) Estar dispuesto a participar en eventos demostrativos y de capacitación para otros productores.

Cultivos Asociados al Programa

Los cultivos que se utilizan en el sistema de labranza de conservación, son los más comunes en la región por ejemplo: maíz, frijol, avena, cebada, trigo y girasol. También se promoverá la siembra del cultivo de garbanzo como una alternativa más para la rotación de cultivos.



Para iniciar un programa de labranza de conservación es requisito un acondicionamiento previo de los suelos (romper el piso de arado), y la incorporación de paja para incrementar los niveles de materia orgánica de los suelos, elemento que induce mayor estabilidad de la estructura favorable del suelo, para el desarrollo de las plantas. Esto se logra en un período de tiempo que va de los 3 a los 4 años (un solo ciclo anual), con volúmenes de 3 a 4 ton ha⁻¹ año⁻¹. Si los volúmenes de materia seca incorporados al suelo son menores (cuando se utiliza el cultivo del frijol) el período de acondicionamiento del suelo es mayor.

Los eventos demostrativos se calendarizan con base en las etapas del desarrollo del cultivo para tratar los temas y problemática propios de cada etapa.

Para el éxito del programa es muy importante la capacitación de los participantes del mismo en todos los niveles: productores, asesores y capacitadores.

Esta se lleva a cabo en forma dinámica:

- a) Para la inducción a la labranza de conservación (convencer).
- b) Para el conocimiento y manejo del nuevo sistema (capacitación).
- c) Para resolver la problemática presentada en cada una de las etapas del cultivo (toma de decisiones).



5.11. CONCLUSIONES

La clasificación de la aptitud de los suelos es una herramienta para el ordenamiento de las actividades productivas. Las prácticas mecánicas son un medio para aminorar los efectos de la sequía.

La cosecha de agua, las prácticas vegetativas y la labranza de conservación permiten la retención de humedad y la oportunidad de lograr un producto bajo condiciones de sequía.

5.12. LITERATURA CITADA

Anaya, M., M. Martínez, A. Trueba, B. Figueroa, O. Fernández. 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

Bancroft H., H. 1884. History of North – Mexican States 1531 – 1800. Bancroft and Co. Publ. San Francisco, Calif. U.S.A.

Barlett J., R. 1854. Personal Narrations of Explorations in Texas, New Mexico, California, Sonora and Chihuahua. U.S. Mexican Boundary.

Birkeland, P.W. 1999. Soils and geomorphology. Oxford Univ., Press, New York.

Blaney, H.F., W.D. Criddle. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. US Dep. Agr. Soil Conserv. Ser., SCS-PP-96, 48p.

Boers, Th.M., K. Zondervan, J. Ben-Asher. 1986. Micro-catchment-water-harvesting (MCW) for arid zone development. Agricultural Water Management. 12: 21-39.

Brady, N.C., R.R. Weil. 2000. Elements of the nature and properties of soil. 12th edition. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc.

Brand D. 1967. The Early of the Range cattle Industry in Northern México. Agriculture History. 52: 117 – 122.

Brengle, K.G. Water conservation practices for dryland farming. IN: Watershed Management in arid zones: A prototype short course. Agency for International Development. School of Renewable Natural Resources. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. p. 105-128.

Brooks, K.N., P.F. Ffolliott, H.M. Gregersen, L.F. DeBano. 1997. Hydrology and the management of watersheds. Second Edition. Iowa State University Press/Ames. Ames, Iowa. USA.

Cantú B., J.E. 1984. Manejo de Pastizales. Departamento de producción animal. Universidad autónoma Antonio Narro. Unidad Laguna. Torreon, Coah. Noviembre de 1984. 213 pp.

CETENAL (1972). Carta edafológica. Escala 1:50000. Comisión de estudios del territorio Nacional. Presidencia de la República. México, D.F.

Cluff, C.B., G.R. Dutt. 1975. Economic water harvesting systems for increasing water supply in arid lands. IN: Watershed Management in arid zones: A prototype short course. Agency for International Development. School of Renewable Natural Resources. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. p. 1147-165.

Colegio de Postgraduados. 1982. Manual de conservación del suelo y del agua. Colegio de Postgraduados-SARH-SPP, Chapingo, México, pp. 65-105.

Diario Oficial de la Federación. 2002. Lineamientos y mecanismo específico de operación del subprograma de apoyos a la conversión del cultivo de frijol, del ciclo primavera verano 2002, por el cultivo de avena forrajera, del estado de Zacatecas. Presidencia de la República. 27 de septiembre de 2002: 19-26.

Diario Oficial de la Federación. 1988. Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. Presidencia de la República. 28 de Enero de 1988.

Diario Oficial de la Federación. 2002. Ley general de vida silvestre. Presidencia de la República. Última reforma aplicada el 10 de Enero de 2002.

Diario Oficial de la Federación. 2003. Ley general de desarrollo forestal sustentable. Presidencia de la República. 25 de Febrero de 2003.

Diario Oficial de la Federación. 2004. Ley de aguas nacionales. Presidencia de la República. Primero de Diciembre de 1992. Última reforma aplicada el 29 de Marzo de 2004.

Eastman RJ. 1995. IDRISI for windows: User's guide (Ver 1.0) Clark University.

Echavarría C., F.G., G. Medina G., R. Gutiérrez L., A. Serna P. 2004. Identificación de áreas susceptibles de reconversión de suelos agrícolas hacia agostadero y su conservación en el Ejido Pánuco, Zacatecas. Revista Técnica Pecuaria en México.

Evenari, M., L. Shanan, N.H. Tadmor. 1968. Runoff farming in the desert. I: Experimental layout. Agron. J. 60: 29-32.

FAO-PNUMA-UNESCO. 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente. Via delle Terme di Caracalla., 00100 Roma Italia. Pp 86.

Figuroa, B.S., A.O. Amante, H.G.T. Cortes, J.L. Pimentel, E.S.C. Osuna, J.M.O. Rodríguez, F.J.F. Morales. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH. Colegio de Postgraduados, México.

Figuroa, B.S., F.J.F. Morales. 1992. Manual de producción de cultivos con labranza de conservación. SARH. Colegio de Postgraduados, México.

Fink, D.H., K.R. Cooley, G.W. Frasier. 1973. Wax treated soils for water harvesting. *J. Range Manage.* 26: 396-398.

Fogel, M.M. 1975a. Runoff agriculture: Efficient use of rainfall. IN: *Watershed Management in arid zones: A prototype short course*. Agency for International Development. School of Renewable Natural Resources. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. p. 166-175.

Fogel, M.M. 1975b. Estimating storm runoff from small watersheds. IN: *Watershed Management in arid zones: A prototype short course*. Agency for International Development. School of Renewable Natural Resources. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. p. 130-146.

Foster, A.B. 1964. *Approved practices in soil conservation*. The Interstate Printers and Publishers, Inc. Danville. Illinois, USA.

Gavande S.A. 1979. *Física de suelos: Principios y aplicaciones*. Editorial LIMUSA, S.A. México.

Hawkins, R.H. 1979. Runoff curve numbers from partial area watersheds. *J. Irrig. and Drain. Div. ASCE.* 105(4): 375-389.

I.N.I.P. 1980. *La resiembra de Pastizales – Fundamentos Selección de Especies, Obras de captación de Humedad y Preparación de Camas de Siembra*. Serie Técnico Científica, Volumen1(N° 5) Septiembre – Octubre.

Jain, B.L., R.P. Singh. 1980. Run-off as influenced by rainfall characteristics, slope and surface treatments. *Annals of Arid Zone.* 19: 119-125.

Jensen, M.E. (ed.). 1980. *Design and operation of farm irrigation systems*. ASAE, Monograph No.3. ASAE. St. Joseph, MI. USA.

Kirkby, M.J., R.P.C. Morgan. 1980. *Soil erosion*. John Wiley and Sons Ltd. USA.

Medina G., G., J.A. Ruiz C., R.A. Martínez P., M. Ortiz V. 1997. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agric. Tec. Mex.* Vol 23. 1: 69-90.

Medina, G., G., J.A. Ruiz C., R. A. Martínez P. 1998. Los climas de México. Una estratificación basada en el componente climático. CIRPC-INIFAP. México, D.F. pp103.

NAS. 1974. More water for arid lands, promising technologies and research opportunities. Board of Science and Technology for International Development. National Academy of Sciences. Washington, DC. USA.

Ponce, V.M., R.H. Hawkins. 1996. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*. 1(1): 11-19.

SCS, 1972. National Engineering Handbook. Section 4 Hydrology. Soil Conservation Service. US Dep. Agric., Washington, DC., USA.

SCS, 1993. National Engineering Handbook. Section 4: Hydrology, Chapter 4. Soil Conservation Service. USDA, Washington, DC., USA.

SEMARNAT, 2000. Ordenamiento ecológico general del territorio. Memoria Técnica 1995-2000. Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental. Dirección de Ordenamiento General del Territorio. México, D.F. 540 pp.

Smith J., g. 1895. Forage Conditions of the Prairie Region. U.S. Dep. Agr. Yearb Aok pp. 309 – 324.

Soil Science Society of America. 1977. Glossary of soil science terms. Madison WI. 53711.135pp

Tanner, C.B. 1974. Measurement of evapotranspiration. IN: R.M. Hagan, H.R. Haise, T.W. Edminster. (eds.) Irrigation of agricultural lands. Agronomy No. 11. American Society of Agronomy. Madison WI., USA. .p. 534-574.

Torres, R., E. (1981) Manual de conservación de suelos agrícolas. Ed. Diana. México, D.F. pp.164.

Trujillo C., J.A. (1985). Prospección de aguas subterráneas en México. IN: Memorias del II ciclo Internacional de Conferencias sobre aprovechamiento de aguas subterráneas en la agricultura. P 69-74. Marzo 13-14, 1985, Torreón, Coah.

UNCED (1992). Earth summit agenda 21: Programme of action for sustainable development. New York. United Nations Department of public information.

Williams, J.R., A.D. Nicks, J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*. 111(6): 970-986.

Wood, A.D., E.V. Richardson. 1975. Design of small water storage and erosion control dams. IN: Watershed Management in arid zones: A prototype short course. Agency for International Development. School of Renewable Natural Resources. University of Arizona. Tucson, AZ, USA. p. 176-227.

Young, A. 1982. Agroforestry for soil conservation. International Council for Research in Agroforestry. CAB International. Wallingford, OX. UK.

6. LIMITACIONES DE AGUA: Eficiencia de uso de agua y la producción de los cultivos

MC. Ángel G. Bravo Lozano
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias
abravo@inifapzac.sagarpa.gob.mx

Dr. Francisco Mojarro Dávila
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

MC. Guillermo Medina García
Investigador del programa de Potencial Productivo
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

6. LIMITACIONES DE AGUA: Eficiencia de uso de agua y la producción de los cultivos.

Ángel G. Bravo Lozano
Francisco Mojarro Dávila
Guillermo Medina García

6.1. INTRODUCCIÓN

6.1.1. El problema del agua en el mundo

El agua es un bien que obtenemos de la naturaleza, un recurso necesario en los más elementales procesos de la vida. Igualmente, el agua resulta fundamental en las actividades económicas. Su carencia o, simplemente, su mayor o menor disponibilidad condiciona el desarrollo, especialmente en territorios donde la sequía se presenta con mayor rigor, ya que en estos lugares el recurso agua puede ser la piedra angular que decida el modelo de futuro.

Gran parte del agua de la Tierra es poco apta para el consumo humano pues el 97,5% es agua salada, por lo que se dispone sólo de 2,5% de agua dulce, casi toda ella congelada en las profundidades de la Antártica y Groenlandia. Sólo se pueden explotar fácilmente las cantidades mucho más pequeñas de agua dulce de los ríos y lagos, del suelo y de los acuíferos poco profundos. Estos son los principales componentes de los recursos hídricos de la Tierra, alimentados por la precipitación y por el agua de deshielo de los glaciares en algunas zonas, y completados por el rocío y el goteo de niebla en ciertos lugares (Figura 6.1).



Figura 6.1. Disponibilidad de agua dulce en el mundo. UNESCO, 1997.

Conforme aumenta la población, aumenta también la demanda de agua dulce para la producción de alimentos, el uso doméstico (municipal) e industrial. La agricultura es siempre el mayor usuario de todos los recursos hídricos tomados en su conjunto, por ejemplo, la lluvia y el agua en los ríos, lagos y acuíferos. La agricultura absorbe alrededor del 70% del consumo mundial, el uso doméstico un 10% y los usos industriales un 21% (Figura 6.2).

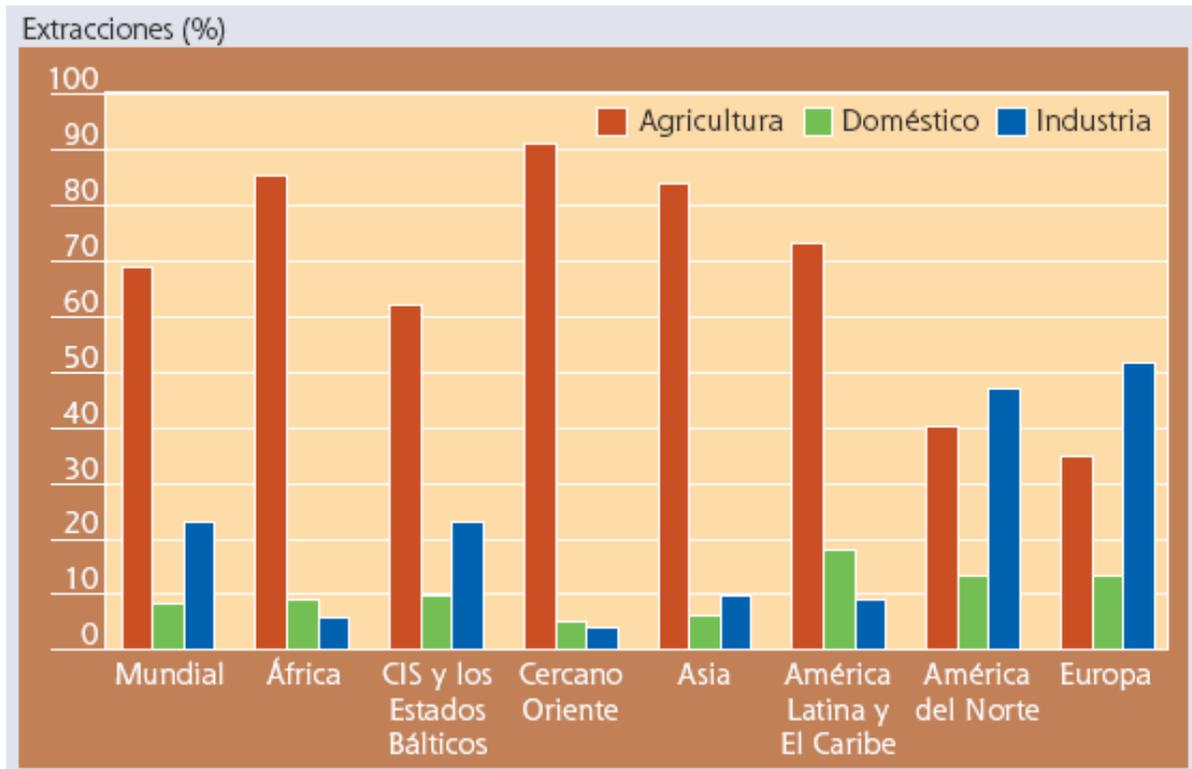


Figura 6.2. Extracciones de agua por región y por sector.
Fuente: Agua y Cultivos. FAO. 2002.

La población mundial crecerá de cerca de los 6 000 millones de habitantes de hoy día a más de 8 000 millones en el año 2030. Por consiguiente, en los próximos 30 años habrá que alimentar a 2 000 millones de personas más. La FAO estima que la producción mundial de alimentos deberá incrementarse en cerca del 60% para alimentar a esa creciente población. El uso agrícola del agua será un elemento clave para aumentar la producción de alimentos, especialmente en muchos países en desarrollo, donde a menudo es escasa. Actualmente, cerca de 800 millones de personas en los países en desarrollo están crónicamente desnutridas (FAO, 2003).

La disponibilidad de agua dulce impone límites al número de personas que puede sostener una zona e influye en el nivel de vida. A su vez, el crecimiento y densidad de la población afectan habitualmente la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos de una zona cuando los habitantes tratan de abastecerse de agua cavando pozos, construyendo depósitos y embalses y desviando el curso de los ríos (Kraemer 1998). Si las necesidades son constantemente superiores a los

suministros disponibles, en algún momento el uso excesivo de agua lleva al agotamiento de los recursos hídricos de superficie y subterráneos y provoca la escasez crónica de agua (Merla 1998).

Más allá del impacto del crecimiento mismo de la población, la demanda de agua dulce ha estado aumentando en respuesta al desarrollo industrial, la dependencia creciente en la agricultura de regadío, la urbanización masiva y los niveles de vida más altos. En este siglo, mientras la población mundial se ha triplicado, la extracción de agua ha aumentado más de seis veces (Juma, 1988).

El agua y la seguridad alimentaria están estrechamente relacionadas. Aproximadamente 800 millones de personas en el mundo todavía pasan hambre y la mayoría de ellos viven en regiones deficitarias de agua. Debemos de estar conscientes que frecuentemente la falta de acceso al agua es un factor limitativo muy importante para aumentar la producción de alimentos. Una de nuestras prioridades principales debe ser aumentar la eficiencia del riego, produciendo más por cada m³ de agua empleado (FAO, 2002).

Para evitar la crisis del agua, sobre todo en países donde ya escasea y la población crece rápidamente, es vital contener el aumento de la demanda de agua mediante una mejor gestión de este recurso mientras se retarda a la brevedad posible el crecimiento de la población. Los programas de planificación familiar son muy importantes, no sólo para la salud reproductiva, sino también para la sostenibilidad del uso de agua dulce y otros recursos naturales en relación con el tamaño de la población (Falkenmark, et al, 1999 y Mckibben, 1998).

La competencia por el suministro de agua dulce produce tensiones sociales y políticas. Las cuencas fluviales y otras masas de agua no respetan las fronteras nacionales. Así, por ejemplo, la utilización del agua por un país situado aguas arriba suele menoscabar el suministro disponible para los países situados aguas abajo. En los albores del siglo XXI se vislumbra el peligro creciente de conflictos armados por el acceso a suministros de agua dulce (Bulloch y Darwish, 1993; Economist, 1988; Postel, 1996 y Suresh, 1998).

6.1.2. El problema del agua en México

El territorio mexicano cuenta con una superficie cercana a los 2 millones de km². Más del 65% de la superficie de nuestro país es árida o semiárida, y en dicha porción del territorio se presenta apenas el 20% de los escurrimientos, mientras que ahí se asientan las tres cuartas partes de la población del país.

México tiene una precipitación media anual de 780 mm, su escurrimiento medio anual es de 417 km³ (el 1% del escurrimiento mundial); y la disponibilidad media anual por habitante es de 5,125 m³, aproximadamente el doble del promedio de disponibilidad per-cápita a nivel mundial; sin embargo, insuficiente para considerarse un país con disponibilidad natural de agua extraordinaria (Rendón, 1997).

El desarrollo de la irrigación en México a partir de 1926 está directamente ligado con la evolución de los Distritos de Riego. En ese año se creó la Comisión Nacional de Irrigación con el objetivo de favorecer el desarrollo de la agricultura de riego. El área irrigada en México en esta época era de aproximadamente 700,000 hectáreas. A partir de la creación de la Comisión Nacional de Irrigación, la superficie irrigada ha aumentado hasta 6'200,000 hectáreas (González, 2003).

De acuerdo a las estadísticas de la Comisión Nacional del Agua (CNA, 2001) la distribución del agua en México es muy superior para el uso agrícola que para los usos urbano e industrial, por lo que un uso eficiente del agua en la agricultura dará un buen margen para la obtención de una eficiencia global en el uso del agua en cualquier región en estudio (Cuadro 6.1).

Se estima que en el año 2000 se extrajeron de los ríos, lagos y acuíferos del país 72 km³ para los principales usos consuntivos. Este volumen representa el 15% de la disponibilidad natural media nacional (escurrimiento superficial virgen y recarga de acuíferos), y de acuerdo con la clasificación de la ONU (1995), el recurso del país se considera como sujeto a presión moderada. Sin embargo, en las zonas del centro, norte y noroeste, este indicador alcanza un valor del 44%, lo que convierte al agua en un elemento sujeto a alta presión y limitante del desarrollo. El uso consuntivo predominante en el país es el agrícola, ya que representa el 78% de la extracción, seguido por el uso público urbano con el 13% y la industria con el 9%. (CNA, 2002).

Cuadro 6.1. Estimaciones brutas de agua dulce y sus usos, año 2001. (CNA, 2002)

Usos	Origen		Volumen Total (km ³)	Porcentaje De Extracción
	Superficial (km ³)	Subterráneo (km ³)		
Agropecuario	36.8	19.6	56.4	78
Urbano	3.6	6.2	9.5	13
Industria	5.0	1.6	6.6	9
Total	45.1	27.4	72.5	100

La población, la actividad económica y las mayores tasas de crecimiento se concentran en el centro, norte y noroeste del país, donde la disponibilidad de agua per cápita alcanza valores cercanos a los 2 000 m³/hab/año, valor internacionalmente considerado como peligrosamente bajo. Esta situación comienza a generar problemas de suministro, sobretodo en periodos de sequía. (Figura 6.4).

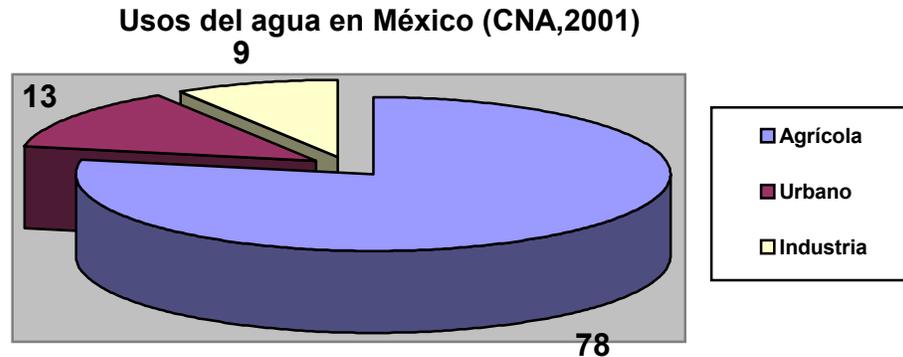


Figura 6.3. Usos de agua en México por sector productivo. (CNA, 2001)

Se podría decir que una nación es vulnerable, y podría verse amenazada por conflictos por sus recursos hídricos, si su capacidad de sostener su ecosistema acuático y proveer a su población del nivel deseado de desarrollo social y económico está comprometido por la naturaleza de su sistema hidrológico, su infraestructura de recursos hídricos y/o su sistema de administración de recursos hídricos (Fernández-Jáuregui, 1999).



Figura 6.4. Contraste entre el desarrollo y la disponibilidad de agua en el país. (CNA, Programa nacional hidráulico 2001-2006.)

Aguas superficiales: El escurrimiento natural promedio anual es de 397 km³ y la infraestructura hidráulica actual proporciona una capacidad de almacenamiento del orden de 150 km³. Se debe tener en cuenta que debido a la variabilidad temporal y espacial de los escurrimientos, es imposible aprovechar totalmente el escurrimiento superficial, especialmente en los meses en que es más abundante.

Aguas subterráneas: La recarga de los acuíferos se estima del orden de 75 km³/año, de los cuales se estiman aprovechamientos por 28 km³/año. Aproximadamente el 66% del agua subterránea extraída se destina al riego de una tercera parte de la superficie total regada; debido a su seguridad y flexibilidad de uso, el agua subterránea es de gran importancia para la producción agrícola. El

70% del volumen de agua que se suministra a las ciudades proviene del subsuelo, con lo que se abastecen aproximadamente 75 millones de personas (Figura 6.5). El agua subterránea se ha convertido en un elemento indispensable en el suministro a los diferentes usuarios bien sea en las zonas áridas donde constituye la fuente de abastecimiento más importante y a menudo única o en las diferentes ciudades del territorio las cuales han tenido que recurrir a ella para cubrir sus crecientes requerimientos de agua. (CNA, 2002)

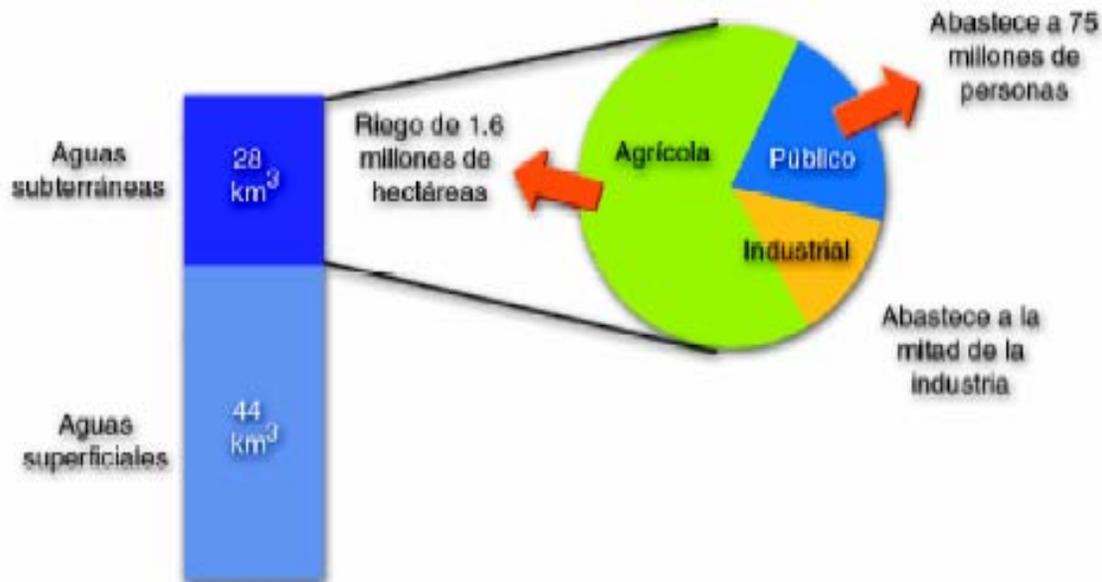


Figura 6.5. Importancia del uso del agua subterránea en el país. (CNA, 2002)

En México se tiene conocimiento que al utilizar el agua con diferentes fines y en diferentes sectores de la economía, suelen generarse conflictos, debido, a que el agua trae consigo un conjunto de beneficios y perjuicios, los cuales, por las características de este fluido, no siempre son distribuidos con equidad. Al respecto se presentan varios ejemplos, como el conflicto que se ha suscitado entre los usuarios del Distrito de Riego (DR) del Bajo Río San Juan, Tamaulipas, y los usuarios urbanos e industriales de la ciudad de Monterrey, NL. El generado por la baja disponibilidad de agua en la frontera entre México y EUA, por lo que cada día la tensión es mayor. Por lo anterior, las situaciones de conflicto por el uso del agua y las cuencas hidrográficas deben merecer una especial atención en la planificación del uso de las fuentes de almacenamiento, en el análisis de aspectos operativos, en el seguimiento de orientaciones para valorizar los servicios ambientales que prestan las cuencas de captación. Todas ellas con énfasis en la participación de los usuarios en dichos procesos, apoyados decididamente por el gobierno federal y estatal sobre la base de políticas equitativas en la distribución del agua (Poblete *et al*, 2003).

La coyuntura y el conflicto más reciente entre el pueblo norteamericano y el mexicano a raíz de las supuestas deudas de agua que tenemos con el vecino país

del norte nos arrojó una primera y letal conclusión: “Comprender a plenitud el grave problema que representa el agua para el país, para su desarrollo y para su gobernabilidad”; de ahí que se considere uno de los factores de primer orden en materia de seguridad nacional.

Hacer de esta crisis del agua, que se entrelaza con fuertes zonas de sequía por el país, el campo propicio para hacer conciencia de un mejor cuidado y aprovechamiento del vital líquido y de una vez por todas sentar bases firmes de una nueva cultura del agua en su sentido más amplio es el objetivo principal. Buscar una nueva cultura del cuidado y consumo del agua es urgente (Luna, 2003).

6.2. DEFINICIÓN DEL CONCEPTO DE USO EFICIENTE DEL AGUA

La situación actual del agua en el mundo corresponde a un panorama de escasez, sobreexplotación y contaminación, de tal forma que en muchos países ya se le considera un factor limitante para un desarrollo sustentable. Lo anterior, orilla a buscar formas de incrementar la eficiencia en el uso del agua (EUA), para impactar en aquellos aspectos donde el efecto del rescate del recurso, tanto en cantidad como en calidad, sea el mayor posible (Phene, 1999).

El Concepto de **"uso eficiente del agua"** incluye cualquier medida que reduzca la cantidad de agua que se utiliza por unidad de cualquier actividad, y que favorezca el mantenimiento o mejoramiento de la calidad de agua. El uso eficiente del agua está muy relacionado con otros conceptos básicos del manejo actual de recursos ambientales, y en muchos casos, forma parte integral de ellos. De estos conceptos relacionados, tal vez el más arraigado es el de la conservación del agua (Tate, 1991).

Este concepto se ha definido de muchas maneras, pero tal vez el concepto de Baumann *et al*, (1980), sea el más atinado, o sea que el uso eficiente del agua es cualquier reducción o prevención de pérdida del agua que sea de beneficio para la sociedad. Visto de esta manera, el uso eficiente del recurso es de suma importancia para la conservación. Al mismo tiempo, la definición de la conservación sugiere que las medidas de eficiencia deben tener sentido social y económico, además de reducir el uso del vital líquido por unidad de actividad.

En México o en cualquier país, donde el agua tiene un gran valor potencial desde el punto de vista de la productividad agrícola, la expansión de la industria y de las áreas urbanas, es de suma importancia lograr una respuesta sobre el significado o el concepto del uso eficiente del agua.

Tomando en consideración solo el agua que se utiliza en la agricultura, Hidalgo (1971) menciona que Israelsen, define la eficiencia en el uso del agua, como la relación entre la lámina de agua estrictamente precisa para lograr el mejor producto neto de las cosechas en un medio determinado, y la derivada con este fin, de la fuente de abastecimiento, de manera que no se altere la fertilidad del terreno.

Esto expresado algebraicamente, es:

$$E = \frac{Lu}{Ld} \quad \dots 6.1$$

Donde: E , es la eficiencia total, Lu , la lámina de agua estrictamente precisa para lograr el mejor rendimiento sin daño a la fertilidad del terreno y Ld , la lámina derivada de la fuente de abastecimiento.

Ld , se puede obtener con buena precisión, y Lu , se podría considerar como la lámina de riego óptima económica. Palacios y Fernández (1972) la definen como el producto de la diferencia entre la evapotranspiración óptima económica y la lluvia efectiva, por un factor de manejo. Algebraicamente es:

$$Lu = (Eto - Pe) K \quad \dots\dots 6.2$$

Donde: Eto = Evapotranspiración óptima económica, o sea la mínima cantidad de agua evapotranspirada por un cultivo para obtener el máximo rendimiento económico.
 Pe = precipitación efectiva, que es la cantidad de agua de lluvia que es utilizada por el cultivo en el proceso de evapotranspiración.
 K = Factor de manejo: este factor es mayor que la unidad y puede deberse a un cierto requerimiento de lavado de suelo, agua para mantener inundado el cultivo como en el caso del arroz o riegos necesarios para el control de plagas u otros motivos, diferente al uso en el proceso de evapotranspiración.

Es difícil conocer Lu con precisión, debido a que los términos que la componen como Eto y K , son difíciles de medir o estimar y sólo pueden obtenerse por medios experimentales o sea que requiere el apoyo de la investigación agrícola. Por lo tanto, estimar la eficiencia en el uso del agua es muy difícil y sólo pueden lograrse estimaciones gruesas debido a la cantidad de datos que se desconocen. (Palacios, 1975)

En México la eficiencias del riego por gravedad a nivel parcelario son relativamente bajas debido a pérdidas de agua por infiltraciones profundas o escurrimientos, las que ocasionan a su vez problemas de salinidad y drenaje. Se tienen evidencias de suelos salinizados y sistemas abandonados que enfatizan la necesidad de hacer un uso más racional del riego por gravedad. El riego ineficiente tiene su origen en el diseño y manejo inadecuado de los sistemas de riego. El no considerar las complejas inter-relaciones agua-suelo-planta, ya sea por ignorancia o falta de planeación, conduce eventualmente a la reducción de la productividad de la agricultura de riego (Catalán, 1990).

En la región semiárida de Zacatecas, uno de los factores limitantes de la producción de alimentos es la disponibilidad de agua para riego. Además de lo

caro y escaso de este recurso, la baja eficiencia en su uso disminuye la productividad y aumenta el costo de la producción de los cultivos. Por lo que se deben de realizar trabajos de investigación con el objetivo de desarrollar metodologías para aumentar la eficiencia en el uso del agua de riego, teniendo en cuenta el sistema agua-suelo-planta-atmósfera (Bravo y Chan, 1987).

Una de las tecnologías que ayudan a incrementar la eficiencia en el uso del agua, es la utilización de los sistemas de riego localizados, como el goteo; ya sea con manguera rígida o con cintilla, pudiendo ser superficial o subterránea; y la micro aspersión, utilizada con buenos resultados en frutales y en suelos de textura gruesa.

Los agricultores adoptarán tecnologías de riego que ahorren agua si tienen incentivos, siendo uno de los más importantes el aumento del precio del agua de riego. El riego subterráneo y el riego por goteo son probablemente las principales tecnologías que serán aplicadas en los países en desarrollo, donde normalmente la mano de obra es abundante y los recursos financieros escasos. Ambas tecnologías se basan en la aplicación frecuente de pequeñas cantidades de agua directamente a las raíces de los cultivos. Además estas tecnologías que ahorran agua, particularmente el riego por goteo, tienen la ventaja adicional de incrementar los rendimientos de los cultivos y reducir la salinización de los suelos (FAO, 2002).

Estas tecnologías presentan ventajas pero también dudas y preguntas a los productores, una importante es la cantidad de agua y fertilizante por aplicar con este sistema de riego, teniendo serias dudas en la frecuencia de aplicación y las cantidades de agua y fertilizantes en las diferentes etapas fenológicas del cultivo. Debido a las condiciones de falta de agua en los últimos años, el Gobierno Federal ha implementado el programa de fertirrigación a través de los programas de Alianza para el Campo con el objetivo de tecnificar las áreas de riego para aumentar la eficiencia de conducción y aplicación del agua; en una evaluación de este programa, se estima un ahorro de agua del 25% y de energía eléctrica del 15%, se incrementó en un 18% la superficie cultivada y 30% en la producción, también se logró un incremento del 28% en el volumen de productos agrícolas de exportación (Bravo y Echavarría, 2003).

En los últimos años, la escasez de agua ha obligado a reorientar la investigación hacia el uso de sistemas de riego más eficientes que permiten ahorrar agua. Una de las etapas obligadas para el diseño, construcción o instalación y operación de cualquier sistema de riego es la estimación de los requerimientos hídricos de los cultivos que se pretenden establecer en alguna región. En México, el Gobierno está apoyando la tecnología del fertirriego a través de uno de los Programas de la Alianza para el Campo, la cual tiene como objetivos incrementar la productividad por m³ de agua, hacer eficiente su uso, incrementar la producción de alimentos y mejorar la calidad de los productos (Tijerina, 1999).

El riego por goteo ofrece muchas ventajas como un método de aplicación de agua para la producción de hortalizas. Se aplica el agua en la zona de la raíz de la planta a través de emisores que controlan la misma descarga en cualquiera lugar de la parcela, siendo conducida hacia la parcela por tubería de plástico y dentro de la parcela por manguera de poliducto tipo cintilla. Además del agua se puede conducir fertilizante líquido e inyectarse utilizando este sistema en el lugar donde se necesite. Así, las necesidades de agua y la aplicación de fertilizante se pueden realizar de acuerdo a las necesidades de la planta. (Clark, 1992).

El riego localizado ha crecido rápidamente desde la invención del tubo de plástico de bajo costo en los años setenta. El riego por goteo solamente se ha aplicado en una pequeña parte de su área potencial. Sin embargo, los resultados obtenidos en muchos países muestran que los agricultores que cambian de riego por surcos o riego por aspersión a riego por goteo pueden reducir el consumo de agua del 30 al 60%.

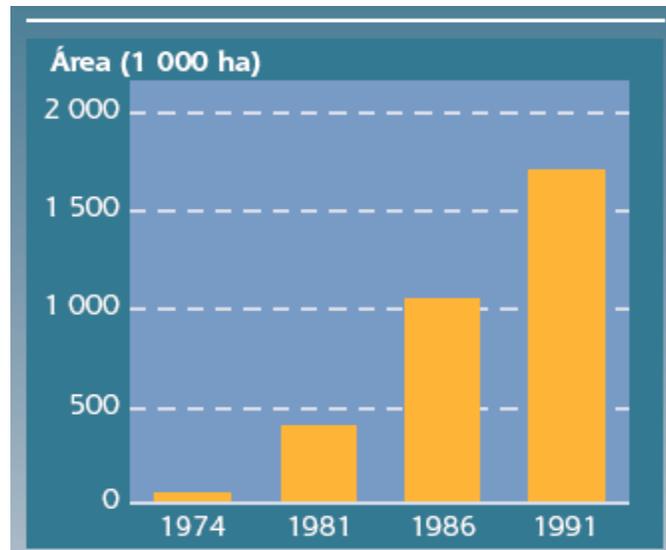


Figura 6.6. Crecimiento mundial del riego localizado. (FAO, 2002)

FAO (2002), menciona seis claves para mejorar la eficiencia de riego:

1. Reducir las filtraciones de los canales por medio de revestimientos o utilizar tuberías.
2. Reducir la evaporación evitando los riegos de medio día y utilizar riego por aspersión por debajo de la copa de los árboles en vez de riego por aspersión sobre la copa de los mismos.
3. Evitar el riego excesivo.
4. Controlar las malas hierbas en las fajas entre cultivos y mantener secas estas fajas.
5. Sembrar y cosechar en los momentos óptimos.
6. Regar frecuentemente con la cantidad correcta de agua para evitar déficit de humedad del cultivo.

6.3. MODELO DE EFICIENCIA DE USO DE LUZ Y EFICIENCIA DE USO DE AGUA: Sistema Producto Chile

En el pasado el análisis de crecimiento se basaba sólo en la medición y discusión de las variables como: materia seca, área foliar, duración del área foliar, formación de frutos y cosecha; sin hacer alguna referencia o comparación sobre los aspectos del medio físico donde se desarrollan los cultivos. Sin embargo, hoy en día la discusión debe centrarse en algunas variable del medio físico como la

radiación solar y sus implicaciones sobre el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos; como herramienta para selección de cultivos a diferentes ambientes y explicar el comportamiento y respuesta del cultivo a los estímulos de varias practicas culturales.

Así presentaremos, en este capitulo la discusión del análisis de crecimiento del cultivo del Chile y la radiación interceptada por las hojas.

Si consideramos que las principales funciones de las hojas son la intercepción de la radiación solar, captura de CO₂ y la producción de biomasa, además de que los cambios diurnos en las tazas de fotosíntesis y transpiración son dependientes de la energía solar, es apropiado analizar el comportamiento de los genotipos de chile ancho y mirasol como sigue:

- a) Calcular la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada por la cubierta vegetal, la cual esta relacionada con el índice de área foliar (IAF).
- b) Examinar la eficiencia de conversión de la PAR a materia seca (MT); la cual depende de la nutrición, agua disponible, clima y características genéticas del cultivo.

6.3.1. Soporte teórico

De la radiación que es interceptada (I) por la cubierta vegetal una parte es absorbida por las hojas (A). La radiación total (S) sobre la cubierta vegetal, se compone de la distribuida por reflexión (R) y por la transmisión (T). Rosenberg (1974) y Campbell (1977) comentan que la radiación que es interceptada por la cubierta vegetal y la absorbida puede calcularse como sigue:

$$I_{\lambda} = S_{\lambda} - T_{\lambda} \quad \dots \quad 6.3$$

$$A_{\lambda} = S_{\lambda} - T_{\lambda} - R_{\lambda} \quad \dots \quad 6.4$$

Donde λ es una longitud de onda especifica del espectro solar.

La radiación solar proporciona la energía para la fotosíntesis, y la radiación fotosintéticamente activa es usualmente definida entre la longitud de onda de 0.4 y 0.7 nanómetros, del espectro solar.

La radiación interceptada (PAR) es afectada por las condiciones ambientales (intensidad de la radiación emitida por el sol, la elevación del sol y por la difusión de la atmósfera) y por características genéticas del cultivo (el tamaño de la cubierta vegetal, la arquitectura de la planta, la orientación y la edad de la hoja (Kumar y Tieszen, 1980).

La penetración de la radiación a través de la cubierta vegetal puede ser descrita como sigue:

$$S(L) = S \exp(-KL) \quad \dots 6.5$$

Donde S(L) es la cantidad de radiación que pasa por la cubierta vegetal y que es absorbida por unidad de hoja (L) o también conocida como índice de área foliar (IAF), y K es un coeficiente que depende de la geometría y de las condiciones de la hoja en cuanto a nutrición y turgencia, el cual debe ser encontrado por medio de la experimentación. Monteith (1972), ha encontrado valores de K entre 0.5 y 0.7 para cereales

En forma práctica PAR puede ser medida en tres formas:

- Por mediciones directas sobre y en la cubierta vegetal, mediante el uso de solarímetros.
- Por medios indirectos, con la medición del IAF, K y aplicando la ecuación 6.5.
- Y por último, con la medición de la radiación que es reflejada de la cubierta vegetal, por medio de radiómetros en la longitud de onda del infrarrojo (Mojarro 1988).

Por otro lado, la cantidad de PAR que es convertida en materia seca, es conocida como eficiencia de uso de la radiación (LUE). Mojarro (1988), definió la LUE en términos termodinámicos debido a que las plantas son sistemas abiertos los cuales dependen de la energía externa (radiación solar). En este caso la LUE, es considerada como el cociente entre la energía usada en la producción de carbohidratos o MS (salida) y la PAR absorbida por la cubierta vegetal (entrada).

Por lo tanto, la PAR interceptada por la cubierta vegetal puede ser el mejor elemento para hacer un análisis de crecimiento y estudiar la respuesta de los cultivos a diferentes ambientes.

La producción de MS puede ser estimada mediante la siguiente ecuación (Monteith 1972):

$$MS = \int_{T_0}^{T_n} E_s * E_c * E_i * S dt \quad \dots 6.6$$

Donde Es es el cociente entre PAR y S; Ec es la conversión fotoquímica a MS (g/MJ); Ei es la fracción de la PAR que es interceptada y; S (MJ/cm²) es la radiación total y t (días) es tiempo.

El mismo Monteith, estimó un valor de 0.425 para Es, ya que este coeficiente es independiente de las condiciones atmosféricas. Además la fracción de la PAR que es interceptada puede ser estimada mediante:

$$PAR = 0.425 \int_{T_0}^{T_n} E_i * S dt \quad \dots 6.7$$

Donde E_i puede ser estimada midiendo la radiación reflejada de la cubierta vegetal y S directamente del campo.

Cuando se conoce la MS , PAR , IAF y t ; la LUE puede ser estimada como sigue:

$$E_c = LUE = MS \div \int_{T_0}^{T_n} PAR dt \quad \dots\dots 6.8$$

Varios estudios se han realizado utilizando esta metodología, para hacer un análisis de crecimiento y de rendimiento, principalmente en cereales (Gallagher y Biscoe, 1978; García 1986, y Mojarro 1982).

Para este caso de estudio del crecimiento de los genotipos de Chile, no se contó con radiómetros para medir en campo S y E_i . Por lo cual, se hizo uso de la información, Mojarro (1982), donde se relaciona la radiación total (S) recibida a nivel de tierra y la latitud del lugar, la cual es expresada en cal/cm^2 y la PAR interceptada por el cultivo, fue estimada con la ecuación 5 modificada, por Ritchie (1983), que tiene la forma siguiente:

$$I = S[1 - a * \exp(-b * IAF)] \quad \dots\dots 6.9$$

Donde a y b son coeficientes empíricos, los cuales para este caso tomaron valores de $a=0.21$ y $b=0.70$ (Ritchie, 1983); I es la radiación que es interceptada por las hojas; y S es la radiación total recibida en la parte alta de la cubierta vegetal (valores tomados de Mojarro 1982).

Las ecuaciones 6.6; 6.7; 6.8 y 6.9 fueron utilizadas para estimar la MS y LUE .

La energía como radiación solar, que es recibida en la parte alta de la cubierta vegetal como la que es interceptada por las hojas, fue necesario convertir sus unidades de cal/m^2 a unidades de MJ/m^2 . La metodología aquí propuesta sólo se aplicó para cuatro genotipos; 31(LEMZ8), 51(CRIOLLO CHUPADEROS), 32 (LEAZ8) y 42 (LEAZ10).

La materia seca (MS) y el índice de área foliar (IAF), fueron medidos en diferentes fechas, el método que se utilizó fue el destructivo. Para la MS , las plantas fueron secadas en un horno, para después medir su peso seco. En el caso del IAF , se usó un equipo integrador de área foliar.

Fueron encontradas diferencias estadísticas, en MS y en IAF , en los diferentes muestreos para los genotipos bajo estudio. Lo que indica claramente que cada genotipo tiene diferente capacidad para interceptar radiación (Figura 6.7) y para su conversión en carbohidratos.

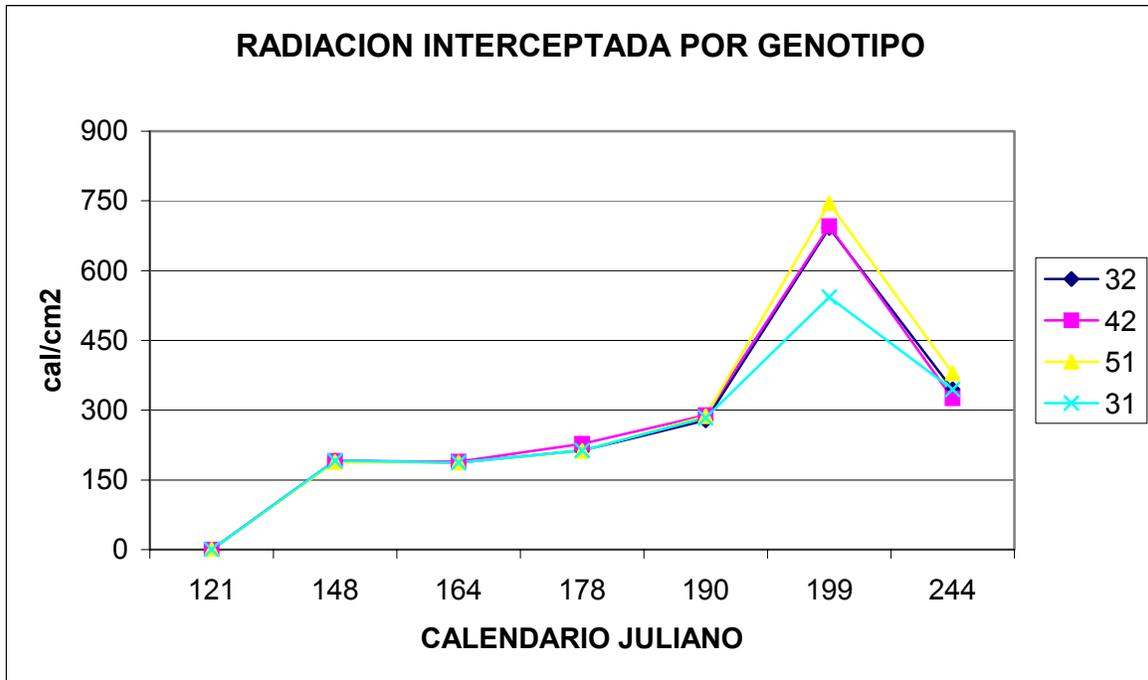


Figura 6.7. Radiación interceptada durante el ciclo de cultivo por los cuatro genotipos.

El follaje de las plantas de chile producen MS por medio de la fotosíntesis, y sólo una fracción de la radiación que es interceptada, es absorbida y almacenada en la cadena-estructura de carbohidratos. Partiendo de este principio básico, la producción de MS fue expresada en unidades de energía por unidad de área. En la Figura 6.8 se muestra el modelo propuesto aquí, donde se observa que en efecto la producción de MS es proporcional a la radiación interceptada por el follaje. Esta relación fue encontrada también por Mojarro (1982), Monteith (1972), Biscoe y Gallagher (1977), para cereales.

La coherencia del modelo para estimar la producción de MS y las mediciones hechas en campo, han probado una nueva base para hacer el análisis de crecimiento considerando la radiación interceptada por el follaje.

Sin embargo algunas consideraciones se tienen que hacer, del modelo propuesto. La radiación interceptada es una función del follaje o del IAF, tomado aquí como el tamaño del sistema fotosintético. Como ya se asentó la función que describe la radiación interceptada es del tipo exponencial del IAF (ecuaciones 6.5 y 6.9). Por lo tanto el análisis de crecimiento, bajo este modelo, es apropiado para tamaños de IAF pequeños, ya que si el IAF toma valores grandes el autosombreado de las hojas se hace importante, lo cual limita la producción de MS con el tiempo. Bajo esta última suposición el modelo propuesto se complica. Aunado a lo anterior están los valores de K, en ecuaciones 6.5 y 6.9, los cuales dependen de la arquitectura (forma, distribución, la posición, entre otras) de las hojas.

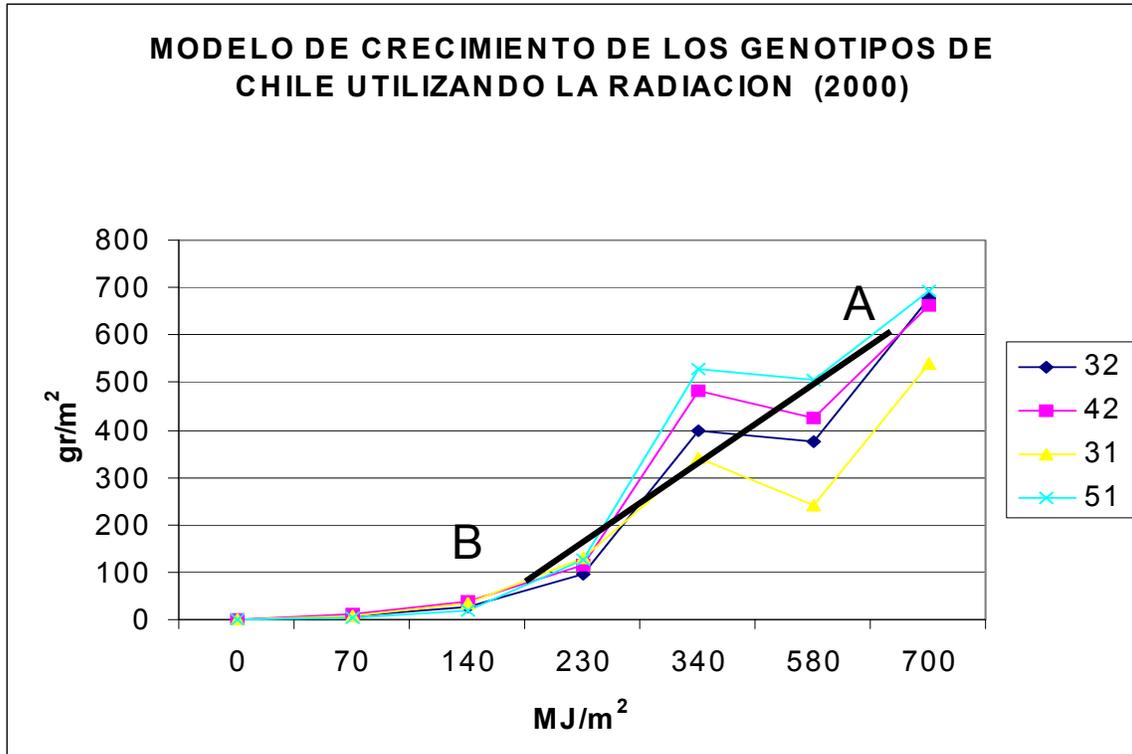


Figura 6.8. La MS en función de la radiación interceptada por los cuatro genotipos.

Se puede observar en la Figura 6.8 que los genotipos que producen mayor cantidad de MS, con la misma radiación interceptada son el 51 y el 42. Lo que indica que además de producir mayor cantidad de MS, son los que tienen un mayor IAF y son capaces de interceptar mayor cantidad de luz (Figura 6.7 y Cuadro 6.2).

Con el fin de verificar este supuesto, los valores de MS medidos en campo fueron analizados mediante una regresión lineal simple, contra los valores predichos por el modelo (Y') y para cada genotipo. Las ecuaciones se encuentran en el Cuadro (6.2).

Cuadro 6.2. Relación entre los valores medios de MS medidos en campo y los predichos por el modelo propuesto. (Y').

Genotipo	Relación MS vs Y'	R^2
31	$MS = 0.734 Y'$	0.90
32	$MS = 0.99 Y'$	0.94
42	$MS = 1.0 Y'$	0.95
51	$MS = 1.0 Y'$	0.93

El tipo de relación encontrados, confirman que la radiación interceptada por el follaje es un buen estimador del crecimiento del cultivo del chile. Además, y muy importante, cada genotipo intercepta diferente cantidad de luz, debido principalmente al tamaño del IAF (Cuadro 6.4). Básicamente esta aseveración la

podemos extender y para explicar el rendimiento en chile seco (Cuadro 6.3), por los diferentes genotipos. Para lo cual hemos trazado una línea hipotética (AB), en Figura 6.8; la cual representa la MS y la eficiencia de luz interceptada. Aquí se desprenden varios supuestos; primero cualquier punto sobre la línea, pero cercano a B, puede interpretarse que el cultivo usa la luz con máxima eficiencia, pero no alcanza valores de máximo rendimiento; básicamente por que la luz interceptada fue muy pobre. Por otro lado un punto cercano a A, se interpreta como de máxima eficiencia, en rendimiento y en la intercepción de la radiación. Además cualquier punto por debajo de la línea AB, indica baja producción, pobre en radiación interceptada y baja eficiencia en uso de luz.

Cuadro 6.3. Rendimientos medios en ton/ha de los genotipos bajo estudio, INIFAP 2000. (Mojarro, 2000).

GENOTIPO	RENDIMIENTO (ton/ha)
C. CHUP-51	3.436 a
LEMZ8-31	3.155 ab
LEMZ7-21	3.127 abc
LEAZ10-42	3.009 abcd
C. CALERA-11	2.828 abcd
LEMZ10-41	2.641 abcd
A. SLP-52	2.478 abcd
LEAZ8-32	2.321 bcd
LEAZ6-22	2.149 cd
C. CALERA-12	2.108 d

Nota: Valores con la misma letra son estadísticamente iguales, según la prueba de Duncan 0.01.

De acuerdo con la anterior, los rendimientos máximos encontrados corresponden a aquellos genotipos de chile que tienen la capacidad de interceptar mayor cantidad de luz, básicamente por tener un IAF mayor. (Cuadro 6.3 y Figuras 6.7 y 6.8).

Siguiendo con el modelo, se cálculo LUE partiendo de la ecuación 8, los valores se encuentran el Cuadro 6.4.

Cuadro 6.4. Valores encontrados de la eficiencia de uso de luz (LUE), para los genotipos en estudio.

GENOTIPO	LUE	IAF (máximo)
31	0.69	2.5
32	0.83	3.9
42	0.87	4.4
51	0.92	5.3

La LUE, es la capacidad que tienen los cultivos en convertir la luz interceptada en MS. De acuerdo con los Cuadros 6.3 y 6.4 y Figuras 6.7, 6.8 y 6.9, el genotipo 51 es el que tiene un mayor rendimiento, mayor producción de MS,

mayor cantidad de luz interceptada y un valor mayor de IAF. Y en ese mismo sentido, este mismo, genotipo tiene un valor mayor de conversión de luz a materia seca, que el resto de los genotipos. Es decir el genotipo 51 por cada gramo de MS producido se requieren de 1 MJ; en el caso del 31, se requieren de 1.5 MJ, es decir 50% de más energía.

Mojarro (1982), García (1986), Monteith (1972), Gallagher y Biscoe (1978), y Ritchie (1983), han encontrado valores de mayores a 2 de LUE, principalmente para cereales. También Mojarro (1988) encontró que LUE, es afectada por diferentes condiciones de humedad en el suelo y por temperatura. En otras palabras, la conversión de la energía en MS, además de ser una característica propia del genotipo, también las condiciones ambientales pueden modificar la eficiencia de uso de luz.

La relación entre IAF y LUE se presenta en la Figura 6.9. Es evidente que la relación es directa y muy importante.

Este modelo, para analizar el crecimiento y el rendimiento de los genotipos de Chile en términos de eficiencia de luz interceptada, proporciona las bases para la explicación de las respuestas en rendimiento de los genotipos, al mismo

ambiente y/o a diferentes ambientes. De tal forma que también puede ser un método racional para la discriminación y/o selección de genotipos, para comparar la pérdida de rendimiento entre ciclos agrícolas, entre regiones, entre variedades, y entre diferentes manejos; tomado en cuenta primero la distribución del IAF y la eficiencia del uso de la radiación interceptada por el follaje y su conversión.

Es de notarse, que la radiación total y la interceptada por el follaje, fueron estimadas ya que se carece de equipo como radiómetros. Sin embargo, el modelo propuesto tiene un buen ajuste con los datos de campo. Definitivamente será indispensable continuar con estos trabajos para determinar las constantes por genotipo y/o cultivo.

Por otro lado, uno de los serios problemas que se tienen es conocer cuál es la demanda de agua real (evapotranspiración) por un genotipo en particular. Esta

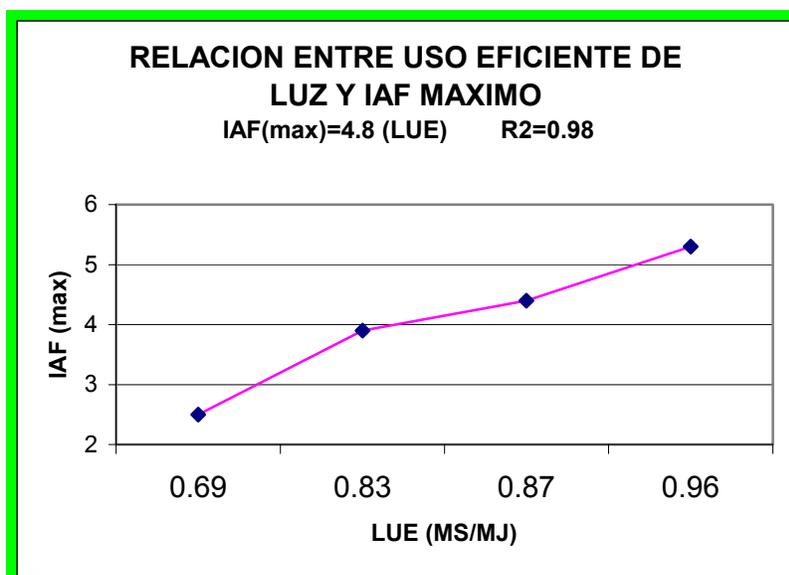


Figura 6.9. Relación entre la LUE y los valores máximos de IAF, para cada genotipo.

variable es indispensable para la toma de decisiones en investigación, en planeación de cultivos de temporal, en la programación del riego, en el diseño y operación de sistemas de riego y en la distribución del agua de riego. Ha sido reconocido por diferentes investigadores, que cuando los cultivos o genotipos que se desarrollaron en un ambiente con condiciones similares de humedad, se obtienen los mismos valores de evapotranspiración ET, pero diferentes rendimientos; sin embargo, bajo condiciones diferentes de humedad, la respuesta en rendimiento es proporcional a la ET (Ritchie 1983).

Retomando lo dicho al principio, donde se planteó que el tamaño del área foliar pudiera estar gobernando la transpiración de los cultivos y la evaporación directa del suelo, se estimó la evapotranspiración (ET) para los cuatro genotipos utilizando los datos del IAF. Para lo cual se utilizó la siguiente ecuación (Ritchie 1983; Mojarro, 1982), misma que ya fue usada para otros cultivos, dando buenos resultados (Mojarro 1988).

$$ET = [0.55\sqrt{IAF}] * E_v \quad \dots\dots 6.10$$

Donde E_v es la evaporación (mm/día) registrada en un tanque tipo “A”

En la Figura 6.10, se presenta la ET (mm/día) estimadas para lo diferentes genotipos. Donde se puede comprobar que los valores más altos de ET, fueron para los genotipos que produjeron más kg/ha de chile seco, bajo condiciones de buena humedad en el suelo. Esta aseveración es congruente con lo encontrado por Ritchie (1983).

Estos análisis requieren de un mayor estudio, ya que la transpiración del cultivo no sólo depende del IAF, sino de otras condiciones. Además la evaporación directa del suelo depende básicamente de dos factores: de la humedad del suelo y del IAF. Es decir, en los periodos de desarrollo tempranos, la evaporación del suelo es mucho mayor que la transpiración, pero a medida que el IAF tiende a ser mayor de 1; el proceso es gobernado por la transpiración, bajo condiciones de buena humedad en el suelo.

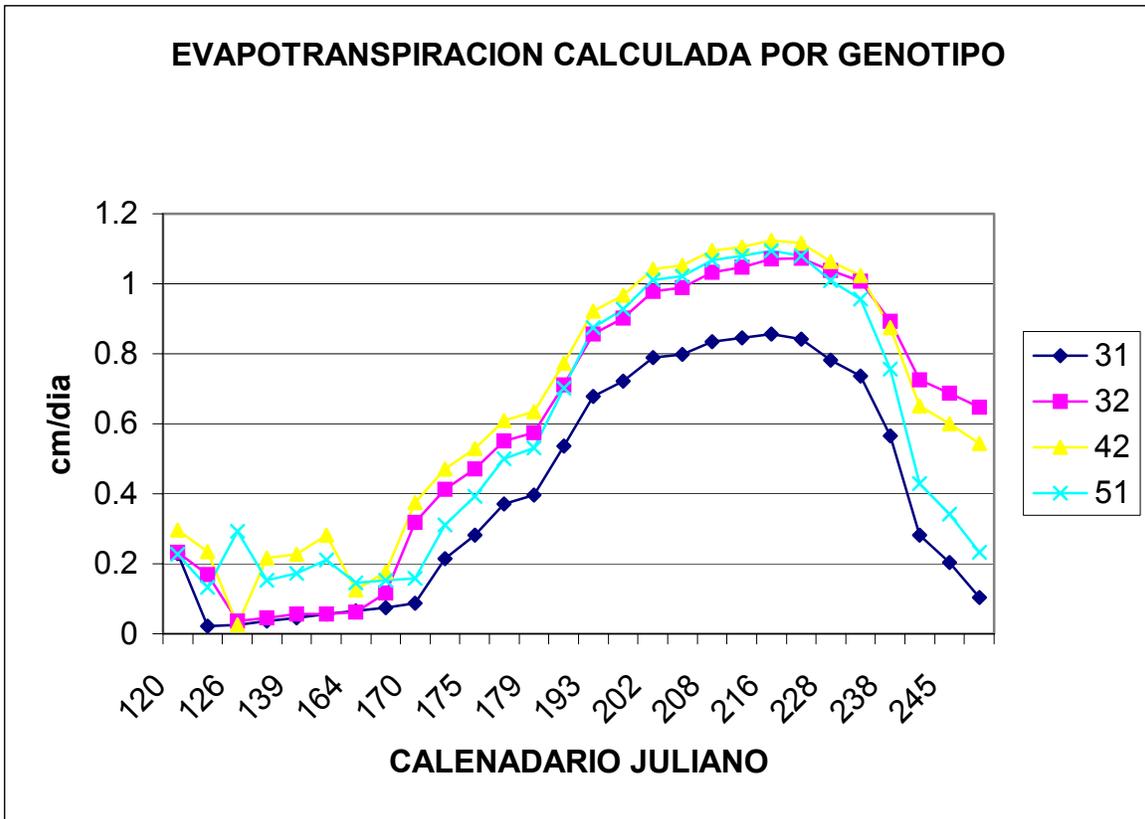


Figura 6.10. La evapotranspiración de los genotipos, según ecuación 10.

6.3.2 Eficiencia de Uso de Agua por los Genotipos

Se ha establecido que la eficiencia de uso de agua, no se ve modificada por condiciones de nutrición. La evapotranspiración de cada uno de los genotipos (Figura 6.10) y se relacionó con el rendimiento total (Cuadro 6.4). Estos datos sugieren que los genotipos con mayor eficiencia en el uso del agua son el 51 y 31, y también que un incremento en ET favorece la producción final de chile seco. Por otro lado, el genotipo 32 es el menos eficiente con un valor de 31.1 kg/cm y también es el que menos capacidad tiene para transformar la radiación interceptada en producción de materia seca (1.5 MJ/gr) comparado con el resto de los genotipos (Cuadro 6.5).

La morfología y la arquitectura de la hoja pudieran ser la responsables de estas respuestas entre los genotipos. Por ejemplo, la tolerancia a la sequía en clones de pasto panizo azul, es debida a que estos tienen un número menos de estomas por unidad de área que los que no son tolerantes a la sequía. Además, estos resultados también fueron observados en el cultivo de cebada donde el mayor número de estomas no afectó la tasa de fotosíntesis pero si incrementó la transpiración de las hojas. En otros trabajos con diferentes líneas de sorgo, unos con hojas de una superficie suave y otros con una superficie con bellos, se encontró que las líneas con la superficie foliar suave se redujo la transpiración de un 8.9 a un 35% (Barnes 1983).

La metodología aquí, presentada ayuda a identificar algunos efectos fisiológicos del cultivo sobre la eficiencia de uso de la luz y la eficiencia del uso del agua. Se sugiere usar esta metodología para integrar el entendimiento o las respuestas de los procesos fisiológicos, más básicos de la planta hacia el entendimiento completo sobre las respuestas de los cultivos al medio ambiente. De acuerdo con estos resultados y el de otros investigadores (Charles-Edwards 1982) hay una fuerte intuición que la productividad de los cultivos pudiera ser incrementada si la selección de los genotipos se realiza bajo las siguientes premisas: 1) incrementar la tasa de formación de materia seca (fotosíntesis), pero esta dependerá de la arquitectura y de la habilidad de las hojas o de toda la cubierta vegetal para interceptar más radiación y su capacidad de utilizar esta radiación en nueva materia seca; 2) reducir el periodo de crecimiento y definir el tamaño y las características de las hojas para que el proceso o tasa de transpiración sea el óptimo.

En forma práctica, la determinación de los consumos de agua o evapotranspiración real de los cultivos, son básicos para tomar decisiones para definir cuándo y cuánto volumen de agua se debe de aplicar en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo del Chile. Estas mediciones son importantes ya que como se dijo anteriormente para la mayoría de la superficie de riego de Chile, el agua proviene de pozos profundos, donde los costos de cultivo, sólo por concepto de energía eléctrica se han incrementado en un 400% debido a la sobreexplotación de los acuíferos.

La toma de decisión para seguir extrayendo el agua del acuífero, con el criterio de sólo aplicar el agua que demanda el cultivo (Figura 6.10), implica algunos ahorros considerables en agua que son del orden de 3,140 m³/ha/año, considerando que un productor medio extrae del acuífero 10,000 m³/ha/año; en costos de energía eléctrica los ahorros son de \$1,100.00/ha.

Cuadro 6.5. Eficiencia de uso de agua por los genotipos, bajo estudio.

Genotipo	ET (cm)	Rendimiento (kg/ha)	EFICIENCIA DE USO DE AGUA (kg/cm)
31	54.9	3155	54.7
51	68.6	3436	50.0
42	77.6	3009	38.7
32	74.8	2321	31.1

6.4. RELACIÓN ENTRE PRODUCCIÓN DE MATERIA SECA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

6.4.1. Concepto de evapotranspiración

La evaporación es un fenómeno físico en el que el agua pasa del estado líquido a vapor; se puede producir evaporación desde la superficie del agua; de la

superficie del suelo; desde la superficie de la vegetación después de una precipitación y desde el suelo cuando este está húmedo. (Sánchez, 2002).

A una temperatura definida, la energía cinética promedio de las moléculas del agua es constante ($EC = \frac{1}{2} mv^2$), pero esto no significa que todas sus moléculas se mueven a la misma velocidad. Las moléculas que se mueven más lentamente poseen mayor estabilidad que las que se mantienen dentro del promedio. Sin embargo, en la superficie del agua las moléculas adoptan velocidades mayores y tienen por tanto, mayor cantidad de energía cinética, lo cual les resta estabilidad. Son éstas las que escapan de la superficie del líquido hacia el espacio exterior, merced a un proceso mediante el cual el agua pasa del estado líquido al gaseoso, conocido como fenómeno de evaporación. Para que ocurra tal fenómeno es necesario en primer lugar cierta cantidad de agua evaporable; segundo, una dotación de energía radiante capaz de suministrar el calor necesario para que el proceso tenga lugar (*584.9 calorías/gramo de agua evaporada a 20° C*); y en tercer lugar, que la atmósfera vecina a la superficie del líquido se encuentre en déficit de humedad (Velasco, 1983).

Los factores que afectan la evaporación directa de una superficie de agua son: la radiación solar; la precipitación; la temperatura del aire; la velocidad del viento y la humedad relativa; y la evapotranspiración potencial E_{To} , responde a las mismas variables, por lo que una estimación de ésta a partir del fenómeno de la evaporación es considerada adecuada (IMTA, 1997 y Ludlow, 1970).

Bajo la consideración de que la evaporación integra la demanda de agua por la planta, se pueden emplear las lecturas registradas en un tanque evaporímetro tipo "A", para determinar la evapotranspiración de los cultivos. (Bravo y Chan, 1987 y Fimbres y Lagarda, 1985).

Evapotranspiración (E_t) es la pérdida o el transporte de agua de una superficie a la atmósfera; esta pérdida incluye el agua que es evaporada directamente del suelo y la evaporada (transpiración) de una cubierta vegetal considerada como el calor latente trasferido (Mojarro, 1990; IMTA, 1997).

Evapotranspiración potencial (E_{tp}): es la cantidad de agua perdida como calor latente de una dada superficie de cultivos que cubren totalmente el suelo en cierto periodo de su desarrollo y se ha utilizado como cultivo de referencia la alfalfa o un pasto, que se encuentra en constante crecimiento, de color verde, con una altura de 8-15 cm., cubriendo completamente el suelo y sin limitaciones de agua (Penman, 1948, Doorenbos y Pruitt, 1977 y IMTA, 1997).

La evapotranspiración (E_t) de un cultivo es el parámetro que más pérdidas de humedad provoca en el balance hídrico. Su cálculo implica el uso de la evapotranspiración potencial (E_{tp}) o evaporación (E_o) medida en un tanque evaporímetro, ajustada por un coeficiente de cultivo (k_c) y un coeficiente de disponibilidad de humedad (k_s), expresada por la relación $ET = k_c \cdot k_s \cdot E_{TP}$ (Mojarro, 1990) o $ET = k_c \cdot k_s \cdot (k \cdot E_v)$ (Palacios, 1980).

El conocimiento de los valores de la evapotranspiración es importante por las aplicaciones que se pueden derivar. Aguilera y Martínez (1996) Jasso y Ramírez (1990) y Villaman, *et al*, (2001) indicaron las siguientes aplicaciones:

- a) Para determinar el área que puede regarse con un determinado volumen de agua disponible.
- b) Es la base para elaborar calendarios teóricos de riego de cultivos.
- c) Estimar los volúmenes de agua que sean necesarios para auxiliar a los cultivos en caso de que la lluvia sea insuficiente para su buen desarrollo.
- d) Para determinar en grandes áreas o cuencas, volúmenes de agua que se requieran drenar.
- e) Para seleccionar los cultivos más adecuados en zonas de agricultura de temporal.
- f) Permite determinar la lámina adicional de riego necesaria para la prevención de problemas de ensalitramiento de los suelos.
- g) Calcular la relación que guarda el rendimiento de los cultivos y el consumo de agua por estos.
- e) Permite determinar, en forma general, la eficiencia con la que se está aprovechando el agua y proporcionar los riegos a los cultivos oportunamente.

Tijerina (1992) citó que los principales factores de las plantas que afectan la evapotranspiración son: el grado de cobertura, el área foliar, la altura del cultivo, la rugosidad de la cobertura y el control estomático de la transpiración. El mismo autor señaló que los factores del suelo que afectan la evapotranspiración son: el contenido de humedad, la profundidad del manto fríatico y la salinidad.

6.4.2. Métodos para la estimación de la evapotranspiración

En la actualidad existe una gran cantidad de métodos directos e indirectos que permiten estimar la evapotranspiración a partir ya sea, de variables tomadas en el campo o utilizando variables meteorológicas. Estos últimos, involucran el empleo de ecuaciones empíricas, las cuales requieren de información climatológica fácil de conseguir y, por lo tanto, tienen gran utilidad en la planeación agrícola.

Aguilera y Martínez (1996) indicaron que existen varios métodos para estimar la evapotranspiración, los cuales se han clasificado en métodos directos e indirectos. Los directos proporcionan información directa del total de agua requerida por los cultivos, utilizando para ello instrumentos para la determinación, y proporcionan valores muy apegados a la realidad y, a la vez, sirven para ajustar los parámetros de los métodos empíricos. Entre éstos pueden señalarse: el método gravimétrico, lisimétrico y el evapotranspirómetro de Thornthwaite. Una de las formas de determinar la Etp directamente en campo, es con la utilización de lisímetros (Rosenberg, 1974; Lira, 1986).

Los indirectos proporcionan una estimación del requerimiento de agua a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas; los mismos se han clasificado en climatológicos y micrometeorológicos.

Los climatológicos estiman la evapotranspiración en períodos mínimos de una semana, dentro de éstos tenemos: Penman modificado, evaporación del tanque tipo "A", Turk, Jensen-Haise, Stephens, Makking, Linacre, Blaney-Cridle, Thornthwaite, Doorenbos-Pruitt, Ivánov y Papadakis, que utilizan fórmulas empíricas que involucran uno o más elementos meteorológicos. Otros métodos utilizan las unidades térmicas solares, como el de Hargreaves, Jensen y Haise, Horton y Norero, entre otros (Linacre, 1977; Mojarro y Palacios, 1979; Lira, 1986; Ortíz, 1987).

Algunos métodos micrometeorológicos, son, el método de transporte de masas de la ecuación de Dalton, el cociente de Bowen y balance de energía, la ecuación de Thornthwaite-Holzman y la técnica de correlación de Eddy (Chang, 1968).

También existen los métodos aerodinámicos combinados con balance de energía, como la ecuación de Penman y Penman modificada por Monteith, los métodos de Van Bavel, Slatyer y McIlroy, Priestley y Taylor (Chang, 1968). Existe un método muy utilizado por ser muy práctico y es el método de la evaporación medida en el tanque evaporímetro tipo "A", ajustada con un coeficiente que depende de la cobertura del terreno, la humedad relativa y la velocidad del viento (Doorenbos y Kassam, 1986).

De todos estos métodos los más utilizados en el país son el método del evaporímetro, por su simplicidad, el método de Blaney Ciddle y Thorntwaite, debido a que las variables climáticas que utiliza son fáciles de obtener en las estaciones climáticas del país y el método de Penman modificado por Monteith, debido a su soporte científico y su aceptación universal.

El Cuadro 6.6 presenta los modelos empíricos más utilizados para la estimación de la evapotranspiración, ya que estos fueron la base para generar otros.

La selección del método a utilizar para la estimación de la evapotranspiración dependerá de la disponibilidad de las variables climáticas disponibles y del objetivo del estudio.

Cuadro 6.6. Modelos de evapotranspiración potencial más usados. (Mojarro, 1990)

Modelo	Variables de entrada	Grado de resolución	Función empírica	Cultivo de calibración
Thorntwaite	T, N	Mensual	Índice de calor	Zacate
Blaney Ciddle	T, N	Mensual	Temperatura	Varios cultivos
Jensen–Haise	T, Rs	5 Días	Coeficiente de temperatura para el mes más caliente	Alfalfa
Penman	T, Rn, G, V	Diaria	Función del viento	Zacate
Priestley y Taylor	Rn	Semanal	Función de temperatura	Varios cultivos
Van Bavel y Busingev	T, Rn, G, V, P, e, Z, Zo, Ev	Diaria	Coeficiente de rugosidad de la cubierta vegetal	
Evaporímetro	Ev	Diaria	Coeficiente por microclima	

Rn radiación neta

T temperatura media

Ev evaporación

V velocidad del viento

Z altura de la cubierta vegetal

P presión barométrica

N horas disponibles de luz

Rs radiación solar

G calor del suelo

e déficit de presión de vapor

Zo longitud de la rugosidad

Para la determinación de la evapotranspiración del cultivo con fines de diseño, cuando se utilizan sistemas de riego localizado, ésta puede ser calculada por diferentes métodos empíricos y su aplicación es función de la información climatológica disponible para la región bajo estudio; entre los métodos más difundidos a nivel mundial están los publicados por Doorenbos y Pruitt (1977), en donde detallan los procedimientos para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_o), que denota el valor de la evapotranspiración para diferentes condiciones climáticas.

Los procedimientos a que se hace referencia tienen diferente grado de confiabilidad, así, por ejemplo, con los métodos de Blaney y Criddle y el de Radiación (modificación de la fórmula de Makkink) se obtienen resultados confiables para períodos de un mes, mientras que muchos investigadores han estimado la ET_o para períodos de diez días y hasta de una semana. El método para estimar ET_o a partir de la evaporación en el tanque tipo “A”, ha tenido resultados satisfactorios, dado que la medida de la evaporación integra el efecto de la radiación, viento, temperatura y humedad para un lugar específico. En condiciones operativas, los valores de la evaporación medidos en el tanque tipo “A” afectados por sus correspondientes factores de corrección, se han utilizado para calcular los volúmenes de agua de riego a reponer en lotes comerciales de diferentes cultivos bajo sistemas de fertirrigación. Finalmente, el documento citado proporciona el procedimiento de Penman modificado para cálculo de la ET_o dando

resultados razonables para un día. A continuación se resumen algunas fórmulas para estimar la evapotranspiración de diseño (Tijerina, 1999) (Cuadro 6.7).

Cuadro 6.7. Ecuaciones de diseño para sistemas de riego localizado.

Número	Ecuación	Autores
1	$ET_d = 0.6ET_c$	Goldberg, Gornat y Rimon (1976)
2	$ET_d = 0.7E_v$	Goldberg, Gornat y Rimon (1976)
3	$ET_d = 0.6F \cdot E_v$	Aljiburi, Marsh y Huntamer (1974)
4	$ET_d = K \cdot A \cdot E_v$	Shearer (López <i>et al.</i> , 1992)
5	$ET_d = ET_c (0.10 + A') \leq 1$	Decroix (López <i>et al.</i> , 1992)
6	$ET_d = F \cdot E_v$	Hoare <i>et al.</i> , (1974)
7	$ET_d = ET_c [A' + 0.15 (1-A')]]$	Keller (1978)

Donde:

- ET_d Evapotranspiración de diseño
- ET_c Evapotranspiración del cultivo
- E_v Evaporación del tanque tipo "A"
- K Coeficiente de cultivo para riego por goteo
- A Area sombreada por el cultivo
- F $0.8f_1' \cdot f_2$
- $f_1' K_c [A' + 0.5 (1-A')]$
- A' Fracción de la superficie sombreada
- f₂ Factor del suelo
- K_c Coeficiente de cultivo en estado adulto

6.4.3 El coeficiente del cultivo (kc)

El coeficiente del cultivo (kc) es una relación empírica que asocia la evapotranspiración máxima (ET) con la evapotranspiración de referencia (ETP) de un cultivo. El valor de kc varía con el cultivo, con la etapa de desarrollo y en cierta medida, con la velocidad del viento y la humedad (Doorenbos y Kassam, 1986), y se puede expresar de la siguiente manera: $kc = ET/ETP$, o $kc = ET/E_v$ (Denmead y Shawn, 1992.).

Tijerina (1986) presentó expresiones cúbicas incompletas que se han derivado de estudios experimentales para relacionar el valor de kc con la proporción de desarrollo del ciclo del cultivo. Así mismo, García (1979) obtuvo varios modelos cuadráticos y cúbicos de kc a partir de relaciones gráficas presentadas en trabajos experimentales donde se relaciona el valor de kc y el porcentaje de desarrollo del cultivo. Norero (1976) utilizó una ecuación de tipo cúbico incompleta para calcular kc, que requiere una constante que indica la proporción de evaporación en suelo desnudo, el índice de área foliar promedio y la duración del cultivo.

Mojarro y Palacios (1979) determinaron un modelo de k_c para frijol, por medio del índice de área foliar (IAF) y la proporción entre la ET y la E_v . Palacios (1980) mencionó que el coeficiente de disponibilidad de humedad (k_s) para evaluar la relación que guardan el contenido de humedad del suelo con el desarrollo del cultivo ha sido motivo de varias investigaciones, las que han dado origen a diversas funciones para representar dicha relación, como la de Hanson (Palacios, 1980, Norero, 1976, Marinato y Palacios, 1979 y Cumpa *et al*, 1988).

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se puede calcular usando la evapotranspiración de referencia (ET_o) y el coeficiente de cultivo (K_c). El coeficiente de cultivo se define como la relación entre la ET_c y la ET_o . La siguiente ecuación describe esta relación:

$$ET_c = K_c \times ET_o \tag{6.11}$$

donde:

ET_c = Evapotranspiración del cultivo (mm)

K_c = Coeficiente de cultivo

ET_o = Evapotranspiración de referencia (mm)

Los coeficientes de cultivo (k_c) para el tomate, chile y melón se determinaron en la Región Lagunera por (Godoy y Majia 2000) y se muestran en las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13.

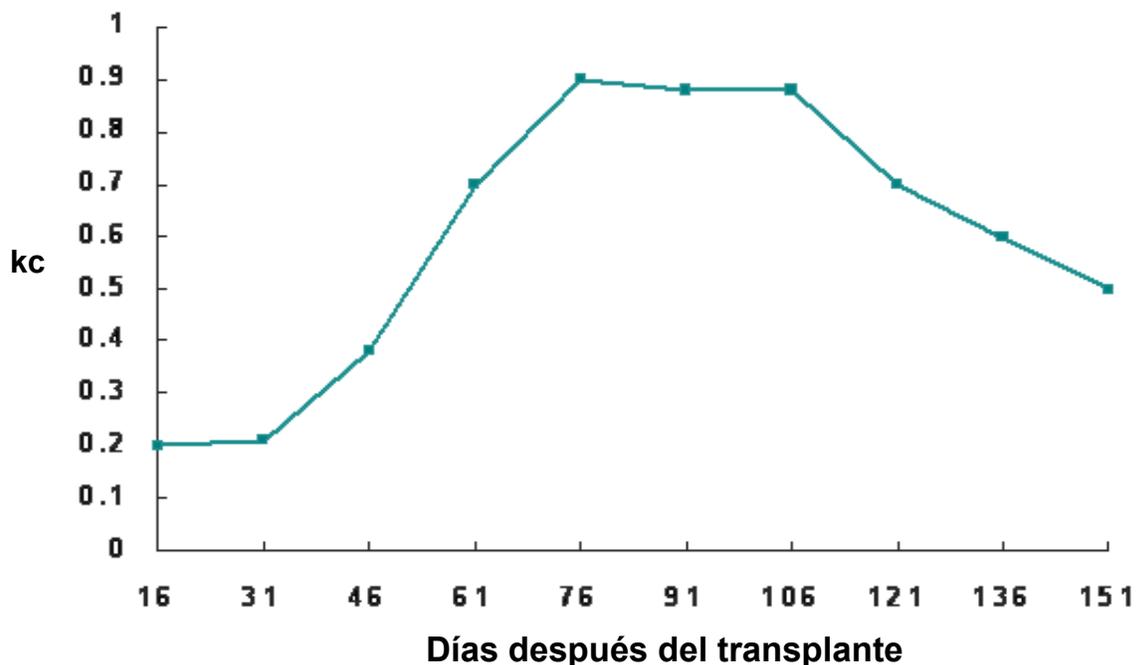


Figura 6.11 Coeficiente de cultivo (k_c) para el chile jalapeño (Godoy, *et al*, 1999)

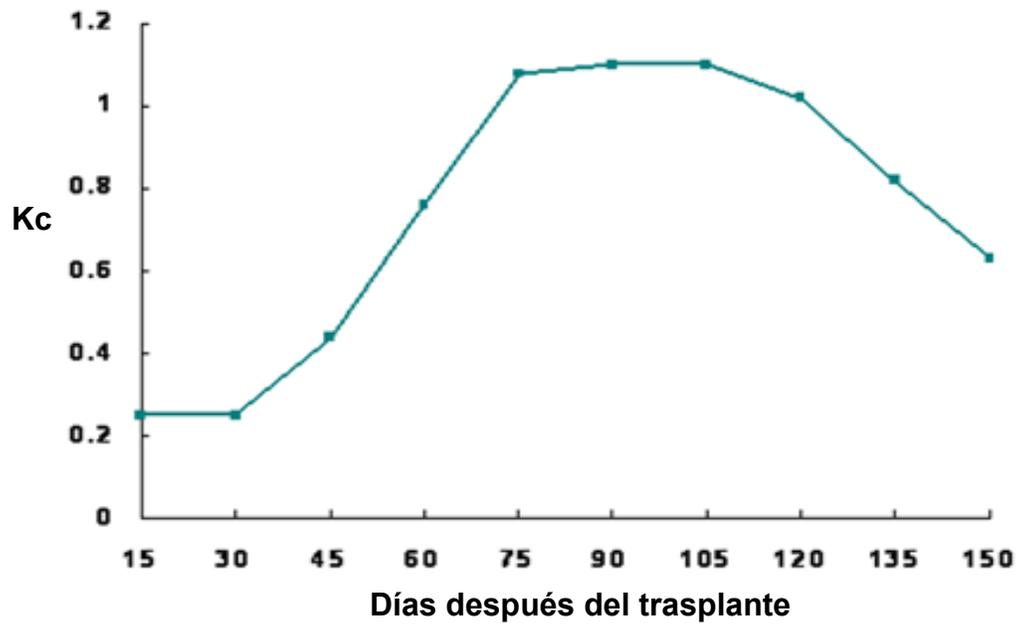


Figura 6.12 Coeficiente de cultivo (kc) para el tomate trasplantado en abril 1 (Godoy, *et al*, 1999).

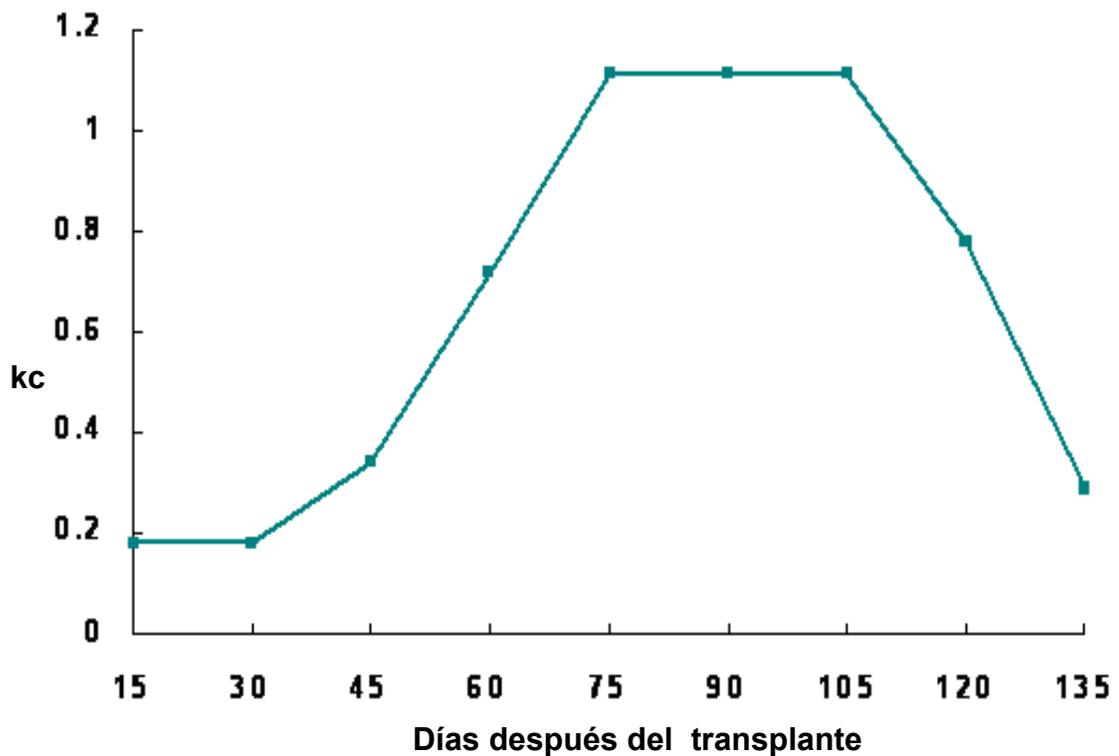


Figura 6.13 Coeficiente de cultivo (kc) para el melón (Godoy, *et al*, 1999).

Godoy *et al*, 2004, determinó los coeficientes de cultivo K_c , para el cultivo de la alfalfa en la Región Lagunera, relacionándolos con las unidades calor acumuladas, los resultados se aprecian en la Figura 6.14.

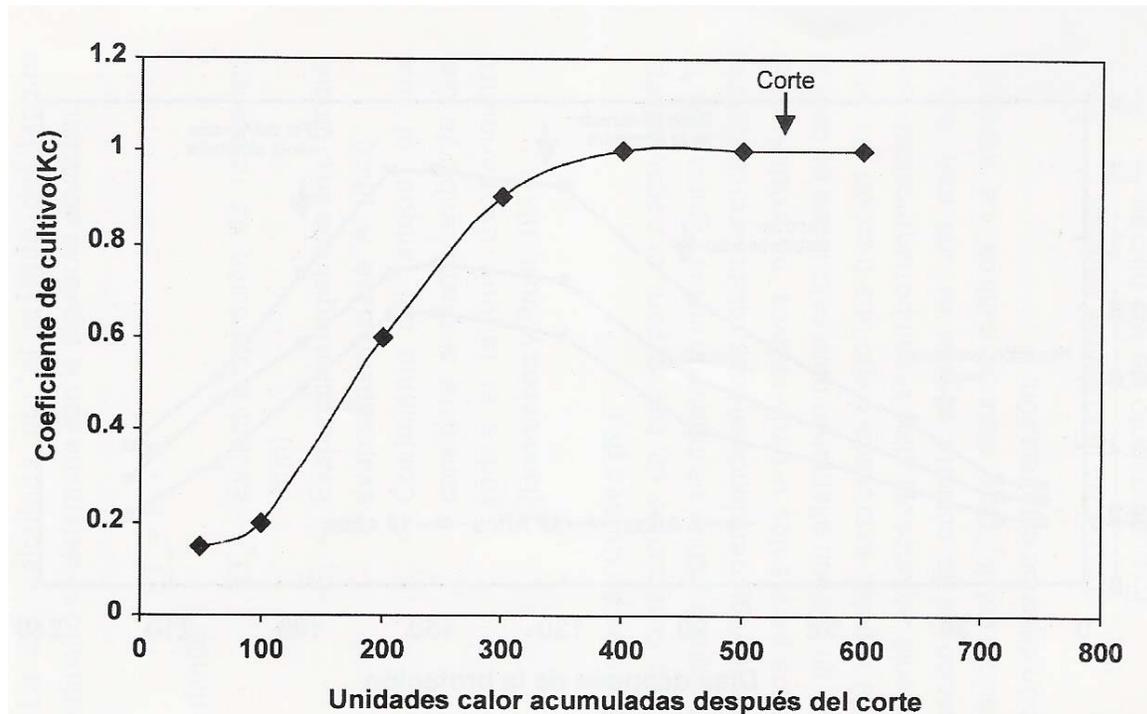


Figura 6.14 Coeficiente de cultivo de las alfalfa en base a unidades calor a través de un corte. (Godoy *et al*, 2004).

Algunos valores del K_c reportados por López *et al*. (1992) son: cítricos 0.7; plátano 0.8; vid 0.9; frutales 0.9; hortalizas 0.9; tabaco 1.0; tomate 1.0 y maíz 1.1.

Verastegui y Bravo (1986), determinaron para la etapa de brotación a cosecha, que el factor de 0.68 de la evaporación de un tanque evaporímetro tipo "A", es el adecuado para calcular la lámina de riego aplicada con un sistema de riego por goteo. Este factor maximizó la producción por planta y disminuyó el número de plantas muertas como consecuencia de una helada por irradiación.

Rumayor y Bravo (1991), estudiaron diferentes factores de la evaporación en una huerta de manzanos con dos sistemas de riego, micro aspersión y goteo y determinaron que los factores de la evaporación como determinante del riego, pueden variar dependiendo del sistema de riego que se utiliza; para el riego por micro aspersión se determinó que el K_c para la etapa de brotación a cosecha es un factor de 0.5 de la evaporación y fue el que maximizó los rendimientos y para el riego por goteo fue el 0.8. Esta diferencia se debe principalmente al tipo de suelo donde se puso en trabajo, con un suelo Migajón Arenoso, donde el agua aplicada por goteo no se distribuía en el suelo a toda el área de las raíces por ser un suelo arenoso, y en el riego por micro aspersión la distribución se hace desde el aire no por el suelo y al tener una mayor eficiencia de distribución del agua para las raíces

se obtienen mayores rendimientos con menos agua aplicada o sea con un Kc menor. Los resultados se muestran en la Figura 6.14.

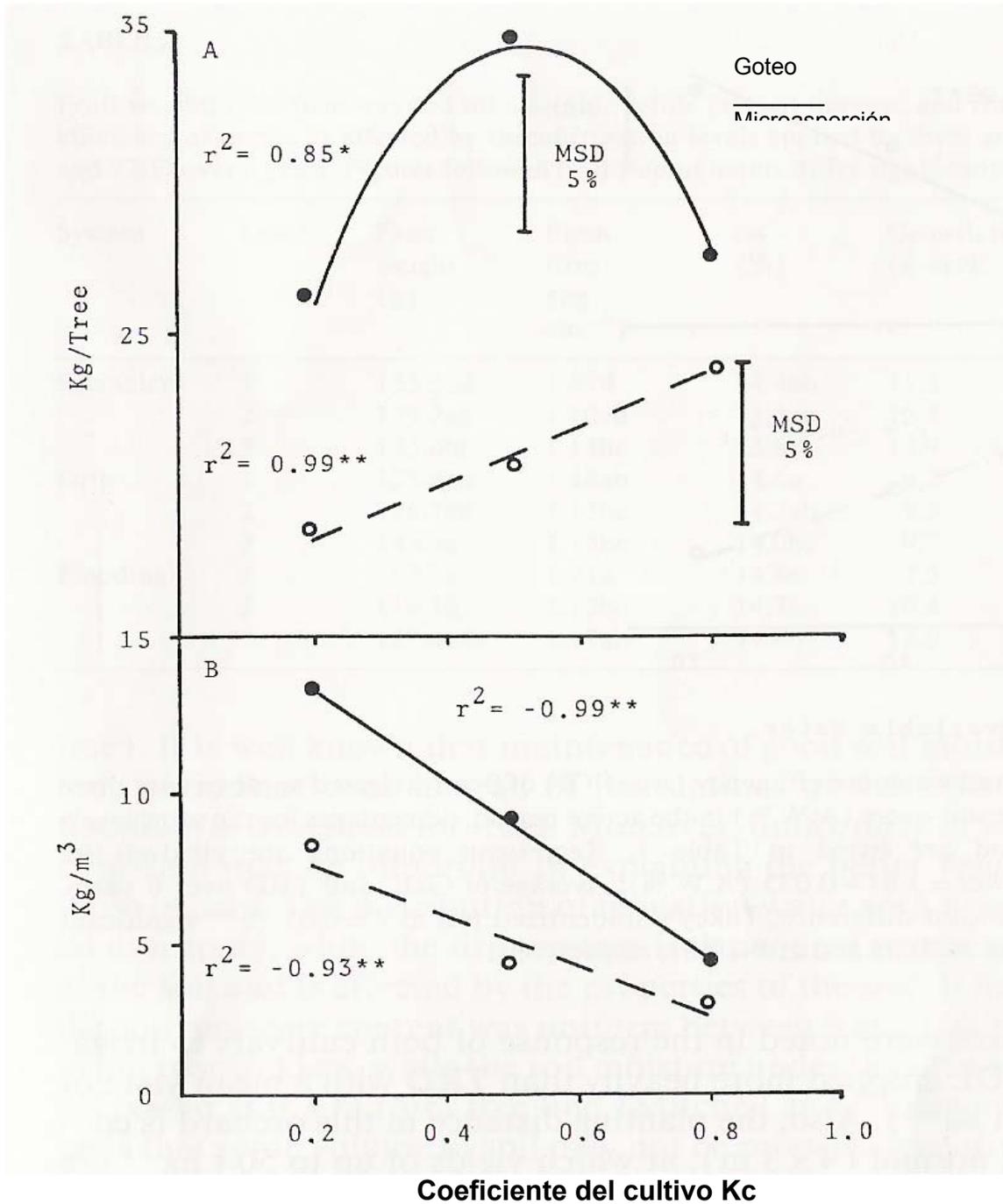


Figura 6.14. Rendimiento de manzana (kg/árbol) para diferentes factores de la evaporación potencial (E_o) o coeficientes de cultivo (k_c), y eficiencia en el uso del agua (kg/m³ de agua aplicada), para los sistemas de riego por goteo y microaspersión. (Rumayor y Bravo, 1991).

En Zacatecas se determinaron los coeficientes de cultivo (kc), para el durazno en sus diferentes etapas fenológicas Zegbe, (2005) y se muestran en la Figura 6.15.

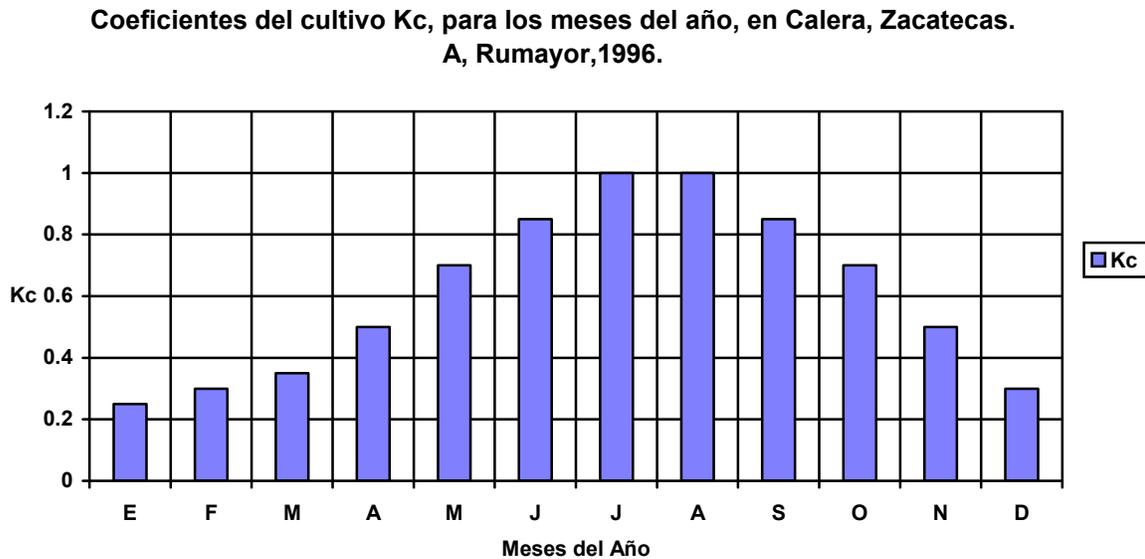


Figura 6.15. Coeficientes de cultivo (kc) para el durazno en Zacatecas y para los diferentes meses del año. (Zegbe *et al*, 2005)

6.5. PROGRAMAS DE RIEGO ÓPTIMO: Eficiente uso de agua en el cultivo del guayabo

6.5.1. Introducción y problema

El cultivo del guayabo ocupó, en México durante 1997, una superficie de 20,869 hectáreas, correspondiendo 5,495 hectáreas al Zacatecas. Las que representa el 26.0 % de la superficie total nacional y aportan el 20.0 % de la producción total de esa fruta. Los rendimientos medios para el año de 1997, fueron 6.754, para la región del Cañón del Juchipila, Zacatecas. La importancia socioeconómica del cultivo de la guayaba para el caso de Zacatecas, se debe a su valor comercial, que en 1996 fue de 89.3 millones de pesos y a que 1,151 productores se dedican a esta actividad. La sustentabilidad de los rendimientos obtenido así como la calidad y la rentabilidad del sistema-producto se consideran bajos, debido a una serie de problemas derivados del manejo de la huertas; entre estos destacan: bajas eficiencias del manejo del agua de riego, lo que propicia periodos largos de sequía y por consiguiente un desarrollo deficiente del árbol, el pH del suelo ligeramente alcalino que limita la absorción de otros nutrientes, y los suelos de la región son suelos calcáreos los que se caracterizan por una baja retención de la humedad.

En la región del Cañón de Juchipila (que comprende a 8 municipios), los usuarios para el riego de las huertas usan agua del acuífero y de presas, sin

embargo el problema es que los niveles de bombeo, en los últimos años se han ido a profundidades mayores de 60 m. y las presas no abastecen las necesidades de riego de las huertas del guayabo, básicamente es el principal problema de la baja sustentabilidad en la calidad y cantidad de fruta por árbol. Además la mayoría de los suelos donde se encuentran las huertas son de origen calcáreo, con contenido de arcillas de tipo expansivas, las cuales tienen como característica en común la poca retención de humedad, lo que origina que cuando los productores riegan las huertas, grandes volúmenes de agua son infiltrados a capas profundas y fuera de la zona radical del cultivo, propiciado también por el método de riego parcelario que usan, que es el de inundación de los cajetes. Dando como resultado periodos largos de sequía y la lixiviación de nutrientes del suelo.

6.5.2. Metodología

El cultivo del guayabo en el estado de Zacatecas es importante por las inversiones considerables que los productores realizan año con año. Lo cual exige que se analice el comportamiento de algunas variables de tipo climático, y poder hacer algunas inferencias del comportamiento y la respuesta del cultivo. En la Figura 6.16, se presenta la precipitación registrada durante el año del 2002 y la media histórica de 57 años de la estación Juchipila (CNA).

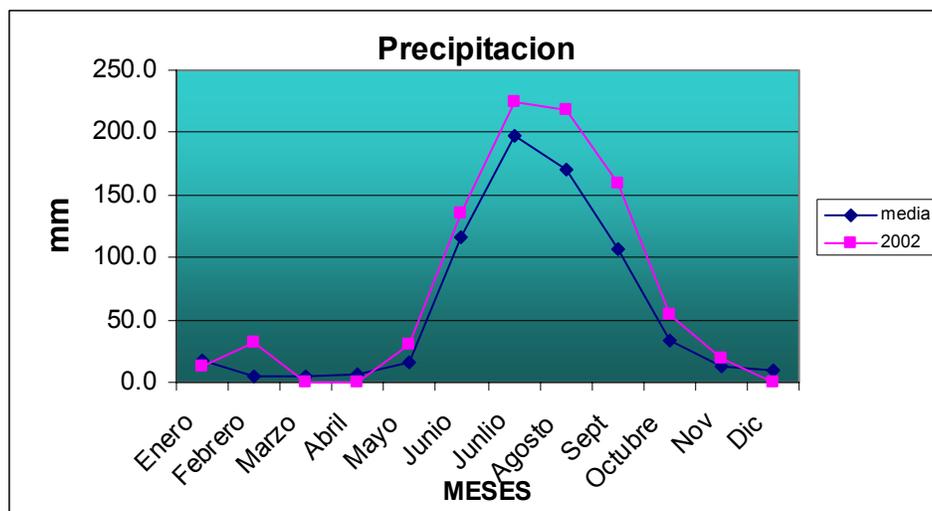


Figura 6.16 Precipitación mensual del año 2002 y la media histórica, registrada en la estación Juchipila. (CNA, 2002)

Como se puede apreciar por las cantidades, en el ciclo de cultivo del 2002 se registraron mayores precipitaciones durante los meses de Junio a Octubre, que los anotados con la media. Además, se considera deficiente en 187.5 mm de precipitación, el total de la media histórica comparada con la total registrada en el año 2002. Se puede decir por los valores medios de la precipitación, que el año 2002 fue más húmedo. Esto indica que el poder secante de la atmósfera demandó de menos evaporación de moléculas de agua en el 2002.

El INIFAP Zacatecas ha desarrollado investigación para generar tecnología para eficientar el manejo del agua de riego, en las huertas del guayabo. Se realizó un proyecto de investigación durante los años de 2001 y 2002. Donde las variables a estudiar fueron tres niveles de fertilización (120-120-120; 160-160-160; y 200-200-200) y un testigo con 60-60-60; y dos niveles de volúmenes de agua, aplicados con el método de riego de microaspersión (742 l/árbol; y 954 l/árbol) y un testigo con el sistema de riego tradicional gravedad (1500 l/árbol) del productor. El diseño experimental fue bloques al azar en parcelas divididas en tres repeticiones, donde la parcela mayor fueron las dosis de fertilizante y la menor los volúmenes de agua. En este caso la parcela experimental fue un árbol, es decir se tuvieron 21 árboles en total.

6.5.3. Resultados

Para la elaboración de la programación del riego, se realizó con un programa de computadora que incluyó los siguientes datos:

Lugar: Apozol, Zac.

Coordenadas: 103°07'00'' y 21°24'00''

Datos de clima: temperatura y precipitación media mensual de 57 años.

Cultivo: Guayabo

Fecha de Inicio del Riego: Diciembre (2001)

Coefficiente de Cultivo:

Crecimiento	Desarrollo	Floración y Formación de Frutos	Madurez	Cosecha
0.4	0.75	1.1	0.7	0.3

Número de árboles por hectárea: 270.

Suelo: Datos del Cuadro 1.

Densidad Aparente: 1.0 gr/cm³

Humedad residual en el suelo, al momento de dar el riego: 70%

Gasto del Emisor: 53 l/h

Gasto disponible: 15 l/s

Eficiencia del riego: 90%.

Método de riego: microaspersión

El calendario de riego que se programo fue el que se encuentra en el Cuadro 6.8. De acuerdo con los datos de clima, cultivo y suelo se programaron 20 riegos en las fechas anotadas. Es de destacar que los riego del *10 al *15 no deberían de realizarse debido a la presencia de precipitación, la cual cubre la demanda de riego por el cultivo, como se verá más adelante. Lo que se recomienda es tener un programa de riegos antes de que inicie la temporada del cultivo, que se realiza tomando en cuenta los datos de clima y los coeficientes del cultivo para cada etapa fonológica, pero este programa puede variar dependiendo principalmente de las precipitaciones, por lo que se pueden suspender algunos riegos cuando la precipitación efectiva es igual o mayor al consumo de agua por el cultivo. Por lo tanto, como el comportamiento de las precipitaciones registradas

durante al año 2002, fueron superiores a la media histórica (Figura 6.16), sobre todo en los meses de junio a septiembre, los riegos programados en estas fechas no se dieron. De acuerdo con esto el calendario de riego se ajustó de la forma siguiente (Cuadro 6.9)

Cuadro 6.8. Calendario de riego programado.

Programa de riego		Lámina de riego (cm)
No. De riego	Fecha	
1	10/12/01	12
2	28/02/02	5
3	30/03/02	5
4	20/04/02	5
5	5/05/02	5
6	16/05/02	5
7	27/05/02	5
8	7/06/02	5
9	17/06/02	5
10	27/06/02	5*
11	08/07/02	5*
12	19/07/02	5*
13	01/08/02	5*
14	12/08/02	5*
15	24/08/02	5*
16	08/09/02	5
17	25/09/02	5
18	15/10/02	5
19	05/11/02	5
20	31/12/02	5
Total		107

Cuadro 6.9. Calendario de riego realizado.

Programa de riego Realizado		Lámina de riego (cm)
No. De riego	Fecha	
1	10/12/01	12
2	28/02/02	5
3	19/03/02	5
4	03/04/02	5
5	15/04/02	5
6	30/04/02	5
7	07/05/02	5
8	16/05/02	5
9	28/05/02	5
10	22/06/02	5
Total		57

6.5.3.1. Humedad residual y volúmenes de agua

Los volúmenes de agua de 742 l/árbol con el método de riego de microaspersión (14 horas de riego con 53 l/h) que equivale a una lámina de riego de 5 cm; de 954 l/árbol con el método de riego de microaspersión (18 horas de riego con 53 l/h) que equivale a una lámina de riego de 7.3 cm; y del testigo con el método de riego de gravedad (aproximadamente 1500 l/árbol) con una lámina de 11.5 cm, propiciaron diferencias en los niveles de humedad residual en el suelo.

Los volúmenes de agua aplicados y que prevalecieron durante todo el ciclo del cultivo, fueron determinantes para que las condiciones de humedad en el suelo fueran diferentes. Se aplicaron 29 análisis de varianza al mismo número de fechas de muestreos gravimétricos. Las diferencias estadísticas fueron encontradas en 13 fechas de 29.

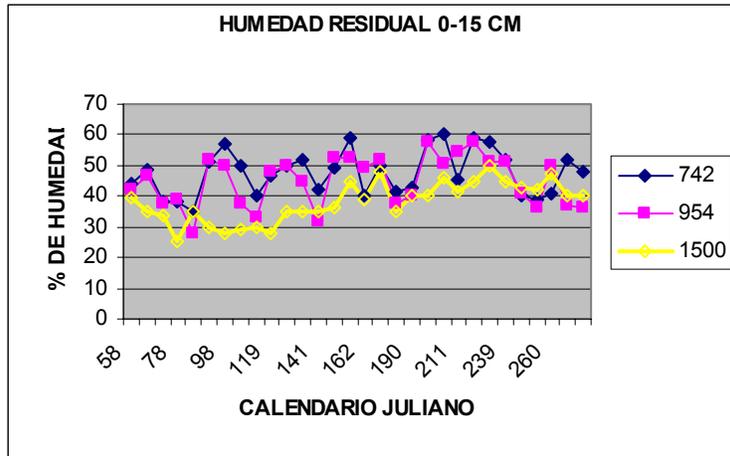


Figura 6.17.- La humedad residual en el suelo, a la profundidad de 0-15 cm y los tratamientos de volúmenes de agua durante el ciclo de cultivo.

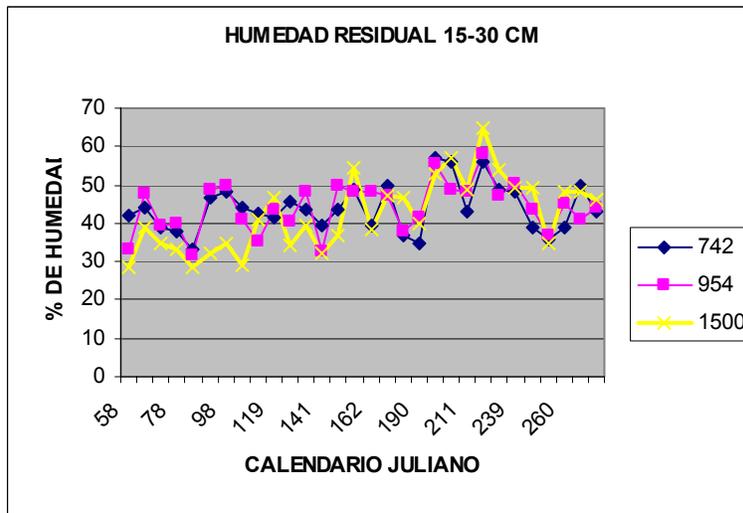


Figura 6.18. La humedad residual en el suelo a la profundidad de 15-30 cm y los tratamientos de volúmenes de agua durante el ciclo de cultivo.

Es importante hacer notar que los niveles de humedad residual en el suelo para la mayoría de las fechas, fueron iguales estadísticamente de mediados de julio a octubre.

Los valores medios del contenido de humedad en el suelo se muestran en las Figuras 6.17 y 6.18.

De acuerdo a estos resultados se puede observar que los valores de humedad para el testigo, riego de gravedad, fueron bajos durante la primera mitad de desarrollo del árbol, comparados con los otros dos tratamientos. Es de notar que, el valor medio del contenido de humedad para Capacidad de Campo es de 47.0 % y del Punto de Marchitamiento Permanente de 25.7%, si observamos la gráficas 2 y 3, se puede concluir que durante los meses de Diciembre del 2001 a Junio del 2002 los niveles de humedad del testigo se acercaron al valor del punto de marchitez. Caso contrario resultó para los tratamientos 742 y 954 l/árbol, donde los niveles de humedad prevalecieron entre 30 y 50%. Por lo tanto, el programa de aplicación del agua con los tratamientos de 742 y 954 l/árbol por riego, propició que la humedad aprovechable en el suelo fuera mucho mayor en este periodo, que el registrado con el método de riego convencional del productor.

6.5.3.2. Producción y productividad

Existen pocos trabajos serios que relacionen los efectos del riego y de la disponibilidad de agua en el suelo y la producción del cultivo del guayabo.

En relación a la variable producción, se aplicaron análisis estadísticos a los resultados de cada una de las calidades de la fruta y al total. De estos análisis se desprende que los rendimientos por calidad y total fueron afectados significativamente por el factor fertilizante y en menor medida por el riego. En el Cuadro 6.10, se muestran los rendimientos obtenidos con los diferentes tratamientos de riego, los cuales fueron referidos a toneladas por hectárea.

En el Cuadro 6.11, se muestra en resumen la significancia estadística de los análisis de varianza, de la respuesta de los tratamientos y la producción de fruta. Definitivamente las diferencias en producción de fruta de varias calidades son como consecuencia de los tratamientos de las dosis de fertilizantes y de los volúmenes de agua. Para poder interpretar y discretizar los efectos del factor dosis de fertilizantes y del riego sobre la producción de fruta, se llevó a cabo un análisis de comparación de medias, los resultados se encuentran en el Cuadro 6.12.

Como resultado de las aplicaciones de los volúmenes de agua se propiciaron diferentes regímenes de humedad en el suelo, cuando menos en la primera etapa de diciembre del 2001 a junio del 2002 (Figuras 6.17 y 6.18). Esto bastó para que se obtuvieran mayores rendimientos de fruta de calidad extra, segunda y total con los tratamientos de 742 y 954 l/árbol y los menores rendimientos se consiguieron con el riego tradicional de gravedad. Esto se debe básicamente a que la condición de humedad residual en el suelo fue mayor; es decir el suelo de estos tratamientos dispuso de mayor cantidad de agua disponible, lo que favoreció a que en el árbol no se presentara un estrés hídrico que menguara el proceso de formación de frutos y su calidad; y al mismo tiempo, el árbol realizó un menor trabajo para absorber el agua del suelo y transportarla hasta la parte alta, para cubrir su demanda de agua. Caso contrario sucedió con el tratamiento testigo, donde en algunas fechas, no se dispuso de la suficiente cantidad de agua para cubrir la demanda de agua del árbol.

Cuadro 6.10. Rendimientos en número de cajas y kg/ha, de los tratamientos aplicados. Peso por caja 12 kg.

Tratamiento*	Repetición	Rendimiento**			
		Extra (Kg/ha)	Primera (Kg/ha)	Segunda (Kg/ha)	Total (Kg/ha)
AH ₁	1	0	5 (16200)	1 (3240)	6 (19440)
AH ₁	2	2 (6480)	4 (12960)	1 (3240)	7 (22680)
AH ₁	3	1 (3240)	4 (12960)	1 (3240)	6 (19440)
AH ₂	1	2 (6480)	3 (9720)	0	5 (16200)
AH ₂	2	2 (6480)	3 (9720)	0	5 (16200)
AH ₂	3	1 (3240)	4 (12960)	1 (3240)	6 (19440)
BH ₁	1	2 (6480)	3 (9720)	1(3240)	6 (19440)
BH ₁	2	0	3 (9720)	1 (3240)	4 (12960)
BH ₁	3	1 (3240)	3 (9720)	1 (3240)	5 (16200)
BH ₂	1	2 (6480)	0	4 (12960)	6 (19440)
BH ₂	2	0	2 (6480)	1 (3240)	3 (9720)
BH ₂	3	1 (3240)	1 (3240)	4 (12960)	6 (19440)
CH ₁	1	1 (3240)	5 (16200)	1 (3240)	7 (22680)
CH ₁	2	1 (3240)	5 (15000)	1 (3240)	7 (22680)
CH ₁	3	0	4 (12960)	2 (6480)	6 (19440)
CH ₂	1	0	1 (3240)	2 (6000)	3 (9720)
C H ₂	2	1 (3240)	4 (12960)	1 (3240)	6 (19440)
CH ₂	3	0	5 (16200)	2 (6480)	7 (22680)
T	1	0	5 (16200)	1 (3240)	6 (19440)
T	2	0	4 (12960)	1 (3240)	5 (16200)
T	3	1 (3240)	4 (12960)	0	5 (16200)

Nota: * A = 120-120-120, B = 160-160-160, C = 200-200-200 y

T = 60-60-60. H₁ = 742 l/árbol (microaspersión); H₂ = 954 l/árbol (microaspersión); y T = 1500 l/árbol (gravedad)

** Los números fuera del paréntesis, número de rejas y dentro del paréntesis kg/ha.

Cuadro 6.11. Significancia estadística de los tratamientos y la producción de fruta de varias calidades.

Tratamiento	Extra	Primera	Segunda	Total
Dosis de Fertilizante	**	**	**	**
Volúmenes de agua	*	**	**	**
Interacción fertilizante x agua	ns	ns	**	ns

Nota: ** altamente significativo

* significativo

ns no significativo.

Cuadro 6.12. Análisis de comparación de medias, se realizó por separado para el fertilizante y para los volúmenes de agua.

Tratamiento	Extra (kg/ha)	Primera (kg/ha)	Segunda (kg/ha)	Total (kg/ha)
Fertilización				
120-120-120	4320.0 ^a	12420 ^a	2160.0 ^b	18900 ^a
160-160-160	3240.0 ^{ab}	6480 ^b	6480.0 ^a	16200 ^b
200-200-200	1620.0 ^{ab}	12960 ^a	4860.0 ^{ab}	19440 ^a
60-60-60	1080.0 ^b	14040 ^a		17280 ^b
Volúmen agua			2162.0 ^b	
742 l/árbol	2880.0 ^a	12960.0 ^a		19440.0 ^a
954 l/árbol	3240.0 ^a	8280.0 ^b	3600.0 ^{ab}	16920.0 ^b
por microaspersión			5400.0 ^a	
1500 l/árbol	1090.0 ^b	14040.0 ^a		17280.0 ^b
por gravedad			2160.0 ^{ab}	

Nota: valores con la misma letra estadísticamente iguales al 0.10, según Duncan.

En conclusión el agua como insumo, en el proceso de producción, es importante para la producción de fruta de calidad y en forma indirecta para la producción total. Estos resultados están de acuerdo con los encontrados en los trabajos de Velásquez y Orduña (1984) y Velásquez y Padilla (1983). Quienes trabajando por varios años en Calvillo Ags, concluyeron que con una lámina de riego total de entre 48 y 54 cm se alcanzaron los más altos rendimiento en calidad de fruta y total. En relación a la frecuencia de riego ellos comentan que no hay diferencias en calidad de fruta y total, dando el riego cada 10, 15, 20, 25 y 30 días. Siguen comentando, que las frecuencias de 10 y 15 días, produjeron más fruta de tercera, considerada la de menor tamaño y avanzada maduración, y mucha se cayó. Por otro lado, Arriaga (1999) trabajando en Michoacán concluye que para obtener tanto calidad como cantidad de fruta la frecuencia del riego debe ser entre 12 a 15 días y en suelos poco profundos con topografía muy movida entre 3 y 5 días.

Estos resultados difieren de los encontrados por Velásquez y Orduña (1984) y Velásquez y Padilla (1983). Sin embargo, y muy importante, el agua en el metabolismo fisiológico de la gran mayoría de las plantas es de mucha relevancia por ejemplo: Varios reportes de investigadores trabajando con diversos cultivos han determinado que la transpiración juega un papel importante en el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Además, el mismo proceso de difusión de CO₂ para la fotosíntesis permite la difusión de vapor de agua a la atmósfera. Por lo tanto, el proceso de transpiración es importante en el enfriamiento de la planta y en el transporte de nutrientes del suelo a los diferentes órganos de la planta. Más importante, el proceso de transpiración esta muy relacionado con el proceso de la fotosíntesis, de ahí que el término de “eficiencia de transpiración” o “eficiencia de uso de agua” es el cociente entre transpiración y fotosíntesis o evapotranspiración y producción de materia seca. Tomando como base lo anterior, se pueden extender las siguientes consideraciones: a) para promover el crecimiento y

desarrollo de los cultivos es necesario incrementar la transpiración; b) para mejorar el rendimientos de los cultivos es indispensable el contar con condiciones óptimas de humedad en el suelo; y c) para mejorar el manejo del agua de riego a nivel parcelario, la programación del riego se debe de aplicar de acuerdo a la demanda de agua por los cultivos (Taylor *et al*, 1983; Kanemasu *et al*, 1984; Palacios, 1981; Van-Keulen y Wolf, 1986; Mojarro, 1977 y 1988; Hsiao y Xu, 2000; y Derner *et al*, 2003).

Como es de esperarse, la aplicación de los tratamientos de volúmenes de agua con el método de riego de microaspersión y el de gravedad propiciaron diferentes cantidades de consumo de agua para cada tratamiento (Cuadro 6.13). Esto es así, debido a que la eficiencia de aplicación en el caso del método de microaspersión es del 90% y el de gravedad de alrededor del 55%. Pero lo más importante es que con el método de riego de microaspersión se aplicaron láminas de riego pequeñas y frecuentes y en el caso del riego de gravedad éstas fueron más grandes y menos frecuentes.

Para tener una clara idea de la ventaja de la aplicación del riego con laminas de riego pequeñas y frecuentes, en relación a la humedad del suelo, se graficaron los valores de la humedad residual del año de 1998, que corresponde a la programación del productor, con ciertos ajustes (Mojarro y Escobedo 1998) y la del 2002. En la Figura 6.20, se encuentran estos valores, las flechas indican la ubicación y frecuencia del riego, azules para el año de 2002 y rojas para 1998. Así se demuestra que los tratamientos de volúmenes de agua aplicados con el riego de microaspersión propiciaron mejores condiciones de humedad, como ya se anotó arriba, que los registrados con el criterio del productor.

Sin embargo, es de relevancia el discutir el consumo de agua, por etapas. La primera etapa que comprende de diciembre del 2001 a principios de junio de 2002. Primero porque existen diferencias estadísticas entre los tratamientos (volúmenes de agua y testigo) en la humedad residual y en la producción; segundo, porque existe poca precipitación que pueda encubrir la importancia del riego; y tercero, es la etapa más sensible a la falta de agua ya que en ésta se registran los eventos fenológicos más importantes como brotación, floración y formación de frutos. Zanini y Pavini citados por Arriaga (1999), comentan que las etapas de crecimiento desarrollo de nuevos brotes, floración y desarrollo del fruto son las etapas de máxima demanda donde el agua no debe de fallar.

Además, este análisis ayuda a interpretar el efecto de las condiciones de humedad residual, las cuales fueron mucho mejores en el riego de microaspersión y con volúmenes de agua de 742 y 954 l/árbol que las del testigo. En el caso del riego de gravedad, se registraron los valores más altos del consumo de agua que en los otros dos tratamientos (Cuadro 6.13), esto se debió a la eficiencia de aplicación del riego que es muy baja comparada por el riego de microaspersión.



Figura 6.19. Método de riego tradicional de gravedad, usado por el productor.

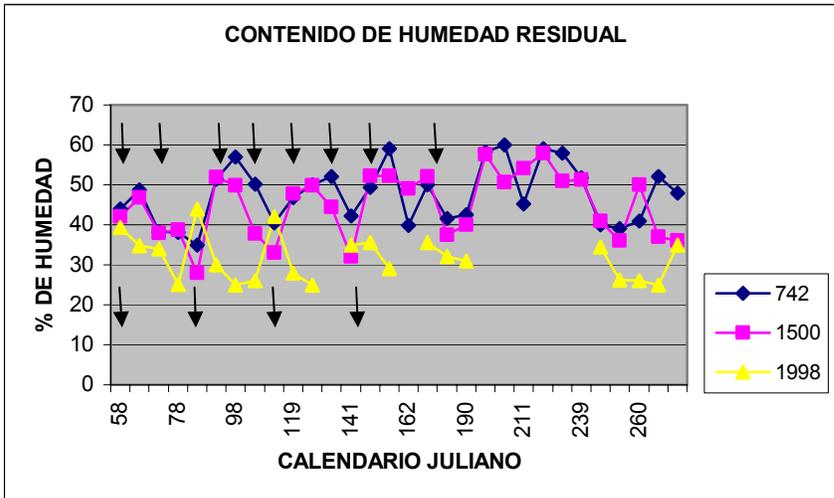


Figura 6.20. Comportamiento de la humedad media residual en el suelo para los tratamientos de volúmenes de agua en el año 2002 y la media registrada durante el año 1998.

En la segunda etapa, que comprende de principios de junio a octubre, los consumos de agua fueron iguales entre los tratamientos. Esto fue debido a que los requerimientos de riego fueron cubiertos por la precipitación, tanto en cantidad como en oportunidad. Además, durante esta segunda etapa, el árbol

demanda una lámina de riego de 55 cm (Cuadro 6.8) que en litros por árbol es de 7,150; y por precipitación se dispusieron de 53.5 cm (6,955 l/árbol) considerando la precipitación efectiva, según ecuación de Ogrosky y Mockus (Palacios 1981). Lo que indica que el riego durante estos meses no es importante ya que la precipitación aporta los requerimientos de riego por el árbol (Cuadro 6.13).

En conclusión, la demanda de agua o evapotranspiración por el cultivo del guayabo es de una lámina total de 110 cm, y no de 54 como se reporta en los trabajos de Velásquez y Orduña (1984), es claro que una parte de la demanda de agua por el árbol puede ser aportada por la precipitación, pero esto es muy aleatorio. Con fines prácticos de planeación y programación del riego, el consumo de agua es de 110 cm y se sugiere usar el calendario de riego del Cuadro 6.8, el

cual se basa en datos históricos de clima, de suelo y de la planta, y además, sólo existe una desviación de 3 cm al comparar los calendarios de riego programado y realizado (Cuadros 6.8, 6.9 y 6.13). Por otro lado y muy importante, la programación del riego con el volumen de 742 l/árbol crea condiciones favorables de humedad en el suelo; ya que Zanini y Pavini citados por Arriaga (1999), comentan que las etapas de crecimiento desarrollo de nuevos brotes, floración y desarrollo del fruto son las etapas de máxima demanda donde el agua no debe de fallar.

Por último, los resultados aquí encontrados soportan que la programación del riego en la primera etapa propicia condiciones de humedad en el suelo, para una buena producción de fruta de calidad y en forma indirecta para la producción total. Otro aspecto fue la eficiencia de uso de agua o la productividad del agua de riego, considerada aquí como los metros cúbicos totales que se consumen para la producción de kilogramos de fruta.

Cuadro 6.13. Consumo de agua en m³ y su productividad.

Tratamiento	Consumo de agua 1 etapa Dic-Jun (m ³ /ha)	Productividad del agua (kg/m ³)*				Consumo de agua 2 Etapa Jun-Oct (m ³ /ha)*	Lámina total (cm)
		E	P	S	T		
742 l/árbol	5700	0.46	2.1	0.58	3.21	5300	110.0
954 l/árbol	7770	0.38	0.98	0.68	2.0	5300	130.7
1500 l/árbol	11550	0.08	1.12	0.17	1.38	5300	168.5

Nota: E = extra; P = primera; S = segunda; y T = total

En el Cuadro 6.13, se encuentra los valores de la productividad del agua de riego, para los tratamientos bajo estudio. Si analizamos la primera etapa, el criterio de riego donde el árbol hace una mejor conversión del volumen aplicado y su producción es definitivamente el de aplicar 742 l/árbol. Por ejemplo para la producción de fruta extra, a medida que se aplican más unidades de agua (m³) se deja de producir entre 6 y 83% de fruta, para los tratamientos de 954 y 1500 l/árbol respectivamente. Es decir esta cantidad extra de agua, no es aprovechada por el árbol para su funcionamiento fisiológico. En otras palabras, se infiere que esta agua se pierde principalmente por percolación profunda y en menor medida por evaporación directa del suelo. Además, si comparamos la producción total del tratamiento 742 l/árbol contra el resto, resulta que a medida que se aplican más unidades de agua, se dejan de producir 289 gr/m³ de fruta.

Por otro lado, en relación al valor de la producción, los costos de producción de bombeo y los de mano de obra por aplicación del riego y de los fertilizantes, se analizan mas adelante.

Los precios de la fruta en la huerta, para este año, fueron como sigue: \$42.0 para la extra; \$37.0 para la primera; y \$15.0 para la segunda, por caja de 12 Kg (comunicación personal del Sr. Hernán Cortes propietario de la huerta).

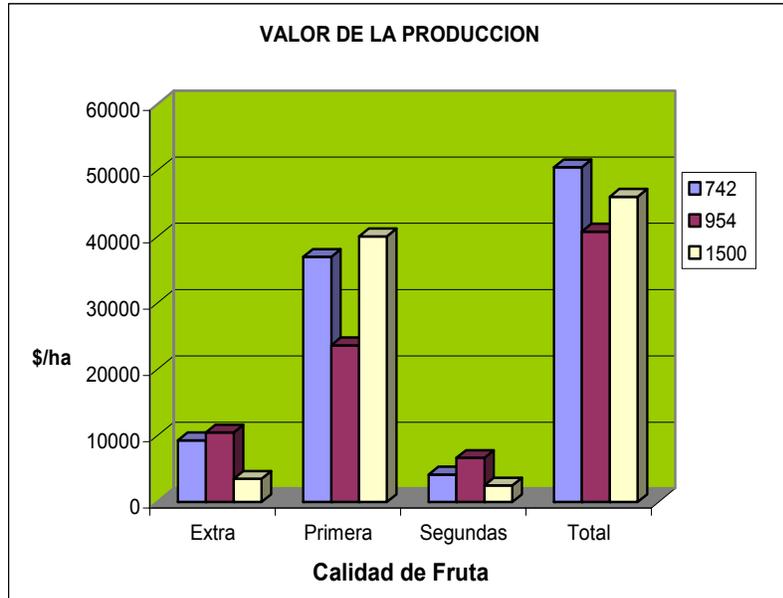


Figura 6.21. Valor de la producción de los tratamientos.

En la Figura 6.21, se muestran los valores de la producción, la cual fue construida con los datos del Cuadro 6.12, referente a las producciones de los tratamientos de volúmenes de agua y con los precios de la fruta arriba citados. Definitivamente el recurso agua aplicado con el criterio de 742 litros por árbol, es el mayor valor de la producción.

En relación a los costos de energía eléctrica para bombeo y el costo de la mano de obra para la aplicación del riego y de los fertilizantes, los resultados se tienen en el Cuadro 6.14. Es importante mencionar, que en el caso de los tratamientos de fertilizantes, estos se aplicaron utilizando la técnica de fertirriego, por medio del inyector tipo venturi de 1/2" utilizando la carga de presión de 2 kg/m² que se tuvo en la línea de conducción (Figura 6.22) y en el caso del testigo, estos se aplicaron manualmente. Los costos de bombeo se tomaron directamente de los recibos de la CFE, en el caso del tratamiento 1500 l/árbol del año de 2001 y de los otros dos tratamientos del año 2002. En el caso con el método de microaspersión y con el criterio de aplicar el riego con 742 l/árbol, los costos de bombeo se reducen

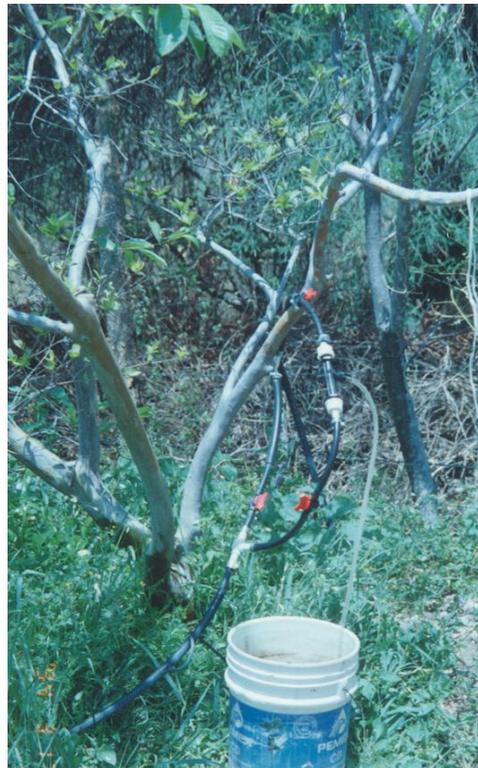


Figura 6.22. Aplicación de los fertilizantes, con el inyector Venturi.

hasta en un 56% con respecto al testigo, 1500 l/árbol con el método de riego de gravedad. Los costos de mano de obra por la aplicación del riego y de los fertilizantes se reducen en un 63 y 89% respectivamente. Es decir en estas tres actividades se deja de invertir 4150.00 pesos por hectárea, con sólo cambiar de método de riego y con el criterio de aplicar el agua de riego con 742 l/árbol y utilizando la técnica de fertirriego la cual consiste en usar las partes del método de riego de microaspersión, como son la tubería y los microaspersores, para disponer los fertilizantes diluidos en el agua de riego justo en el área superficial de influencia de las raíces.

Cuadro 6.14. Costos de bombeo y de la mano de obra para la aplicación del riego y de los fertilizantes.

Tratamiento	Costos (\$/ha)			Total (\$/ha)
	Bombeo	Riego	Fertilizante	
742 l/árbol	4500	150	50	4700
954 l/árbol	5000	150	50	5200
1500 l/árbol	8000	400	450	8850

6.5.3.3. Conclusiones

El agua como insumo, en el proceso de producción, es importante para la producción de fruta de calidad y en forma indirecta para la producción total.

Con fines prácticos de planeación y programación del riego, el consumo de agua es de 110 cm y se sugiere usar el calendario de riego del Cuadro 6.9, el cual se basa en datos históricos de clima, de suelo y de la planta. Por otro lado y muy importante, la programación del riego aquí usada y con el volumen de 742 l/árbol se ahorran 5,850 m³/ha/año y crean condiciones favorables de humedad en el suelo en las etapas de desarrollo de nuevos brotes, floración y desarrollo del fruto que son las etapas de máxima demanda donde el agua no debe de faltar.

Los resultados aquí encontrados soportan fuertemente que la programación del riego en la primera etapa propicia condiciones de humedad en el suelo, para una buena producción de fruta de calidad y en forma indirecta para la producción total. Así mismo, en esta etapa la productividad del agua es muy superior que en la segunda etapa.

Con sólo cambiar de método de riego y con el criterio de aplicar el agua de riego con 742 l/árbol y utilizando la técnica de fertirriego se dejan de invertir 4150.00 pesos por hectárea al disminuir los costos de producción como son los de energía eléctrica y la mano de obra para la aplicación del riego y de los fertilizantes.

6.6. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA

La productividad es la relación entre la unidad de resultado y la unidad de insumo. En este caso el término productividad del agua es usado exclusivamente para denotar la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida o desviada. El valor del producto podría ser expresado en diferentes términos: biomasa, grano, dinero. Por ejemplo, el enfoque del llamado «cultivo por goteo», se refiere a la cantidad de producto obtenido por unidad de agua aplicada al cultivo, por ejemplo kg de materia seca por metro cúbico de agua aplicado. Otro enfoque considera las diferencias en los valores nutricionales de los diferentes cultivos o que la misma cantidad de un cultivo alimenta más personas que la misma cantidad de otro cultivo. Cuando se discute acerca de seguridad alimentaria es necesario tener en cuenta esos criterios (Renault y Wallender, 2000).

La relación funcional entre el rendimiento de un cultivo y el consumo de agua se denomina función de producción del agua. Este tipo de relación normalmente se expresa a través de ecuaciones empíricas que se obtienen mediante técnicas de regresión lineal entre el rendimiento de materia seca (variable dependiente) y el consumo de agua (variable independiente). Existen bases físicas y fisiológicas para considerar que esta relación es lineal y el coeficiente de regresión es constante entre cultivos que pertenecen a un mismo grupo de especies. Cuando se trata de aplicar esta información con fines de planeación la variable que más interesa es el rendimiento comercial. (Jasso y Ramírez, 1990)

No existe una definición única de productividad y el valor considerado en el numerador podría depender del enfoque así como de la disponibilidad de datos. Sin embargo, la productividad del agua definida en kilos por m³ de agua, es un concepto útil cuando se compara la productividad del agua en diferentes partes del mismo sistema o cuenca y también cuando se compara la productividad del agua en la agricultura con otros usos posibles del agua (FAO, 2003).

La producción de agua por los cultivos esta determinada solamente por la transpiración del cultivo. Dado que es difícil separar la transpiración de la evaporación de la superficie del suelo entre las plantas (que no contribuye directamente a la producción del cultivo), la definición de la productividad del agua se puede expresar en términos de evapotranspiración en lugar de la transpiración, esto tiene sentido con trabajos a nivel de campo y para un sistema de producción.

El concepto de función de producción se basa en la teoría sustentada por muchos autores de que el rendimiento de los cultivos es afectado por las variables del régimen de humedad en el suelo durante su desarrollo. Aunque Veihmeyer y Hendrickson (1950) sustentan la tesis de que la disponibilidad del agua en el suelo para las plantas es uniforme entre el rango de capacidad de campo y porcentaje de marchitamiento permanente, y esto es teóricamente demostrable según la termodinámica, la verdad es que la velocidad con la cual las plantas pueden extraer el agua del suelo disminuye conforme el suelo se va secando, hasta que

llega un momento en que la velocidad media de pérdida de agua por transpiración, lo cual produce una alteración en los procesos metabólicos. Si este estado de déficit de agua persiste, la planta no tan solo reduce su rendimiento, sino que puede morir por deshidratación. La experimentación en irrigación ha demostrado que este proceso afecta a la mayoría de los cultivos.

Los datos de múltiples informes sobre la productividad del agua con respecto a la evapotranspiración, muestran considerables variaciones. Por ejemplo, en el trigo es de 0,6-1,9 kg/m³, en el maíz 1,2-2,3 kg/m³, en el arroz 0,5-1,1 kg/m³, en el sorgo forrajero 7-8 kg/m³ y en las papas 6,2-11,6 kg/m³, con algunas variaciones obtenidas en los campos experimentales. Los datos de campo sobre la productividad del agua por unidad aplicada, tal como se informa en la literatura, son menores que los anteriores y varían dentro de un amplio rango. Por ejemplo, para el arroz varió entre 0,05 y 0,6 kg/m³, para el sorgo entre 0,05 y 0,3 kg/m³ y para el maíz entre 0,2 y 0,8 kg/m³. Esta variabilidad ocurre porque los datos fueron recolectados en diferentes ambientes y bajo distintos tipos de manejo del cultivo, todo lo cual afectó no solo el rendimiento sino también la cantidad de agua provista (Kijne *et al.*, 2003).

La utilización práctica que se le da a esta información es principalmente para la planeación del manejo del agua y los cultivos en regiones con baja disponibilidad de agua. En las regiones semiáridas del norte-centro del país, uno de los principales factores que limitan la producción de alimentos es la baja disponibilidad del agua para el riego, debido principalmente a que la mayoría de los volúmenes que se obtienen de este recurso proviene de los mantos freáticos, los que se han sobreexplotado dando como consecuencia natural su abatimiento y un considerable aumento en los costos de la extracción del agua. En estas regiones para lograr aumentar la productividad del agua, se deberá de tener atención en la aplicación eficiente de los demás factores de la producción, como la densidad de plantas, la fertilización, la fecha de siembra, etc. (Bravo y Chan, 1987)

En Zacatecas, con el cultivo del frijol de riego “Negro Zacatecas”, con altas densidades, regando a un 80% de la humedad aprovechable residual y una fecha de siembra adecuada (14 de abril), se logró una productividad de 0.65 kg de frijol por m³ de agua aplicado, cuando el productor tradicional obtiene alrededor de 0.2 a 0.3 kg/m³. (Chan y Bravo, 1987). También en Zacatecas, pero con el cultivo del maíz, utilizando el híbrido H-220, alta densidad, regando a un 80% de la humedad aprovechable residual y una fecha de siembra adecuada (20 de abril), se logró una productividad del 1.12 kg/m³ de agua aplicada, que es muy superior a la obtenida en promedio por los productores, que esta entre 0.30 y 0.40 kg/m³. (Bravo y Chan, 1987)

Según la FAO, (2003), a pesar de ciertas preocupaciones sobre la ineficiencia técnica del uso del agua en la agricultura, su productividad se incrementó por lo menos en 100% entre los años 1961 y 2001. El principal factor responsable por este incremento ha sido el aumento de los rendimientos. En muchos cultivos el aumento de los rendimientos ocurrió sin aumentar el consumo

de agua e incluso, en algunos casos, con menos agua, ya que aumentó el índice de cosecha.

Los principios básicos para mejorar la productividad del agua en el campo, a nivel de un predio o parcela o a nivel de cuenca que se aplican a todos los cultivos, bajo condiciones de riego, son:

- i) incrementar los rendimientos de los cultivos por cada unidad de agua transpirada por este;
- ii) reducir todas las pérdidas (p. ej., drenaje, filtrado y percolación) aumentando la eficiencia de conducción, distribución y aplicación;
- iii) incrementar el uso eficiente del agua de lluvia.

Las opciones a nivel de las plantas radican en el fitomejoramiento, por ejemplo, para mejorar el vigor de las plántulas, aumentar la profundidad de enraizamiento, incrementar el índice de cosecha (la parte comercializable de la planta como parte de su biomasa total) y fortalecer la eficiencia fotosintética. Los mejoramientos más importantes en la estabilidad de los rendimientos han sido, por lo general, producto de la modificación genética para obtener un ciclo de crecimiento apropiado de modo que la duración de los períodos vegetativo y reproductivo estén bien correlacionados con el abastecimiento de agua o con la ausencia de peligros para el cultivo. Las fechas de siembra, floración y maduración son importantes para ajustar el período de máximo crecimiento del cultivo con el momento en que el déficit de la presión de saturación de vapor es bajo. Los períodos de máximo crecimiento del cultivo pueden ser optimizados por medios genéticos. (FAO, 2003)

6.6.1. Productividad del agua de riego: Sistema Producto Chile

6.6.1.1. Introducción

El cultivo del chile seco es una especie que requiere del riego para la producción. Y para que los sistemas de producción sean rentables, en la mayor parte de los estados productores de chile seco, es indispensable el riego. Debido a que la precipitación no alcanza a cubrir la demanda de agua del cultivo; así por ejemplo, en el estado de Zacatecas y específicamente en el Municipio de Calera el cual es uno de los principales productores de chiles, la precipitación media mensual histórica de 25 años, no alcanza a cubrir el 50% de la demanda (evapotranspiración potencial) de agua por los cultivos

Por otro lado, en los foros regionales del CONACYT con las Fundaciones Produce y los productores agrícolas de estos estados, ha sido reiterativo que uno de los principales problemas que limitan el incremento de la producción y la productividad del sistema producto chile seco, es la poca disponibilidad y el alto costo del agua para riego y el uso ineficiente del recurso agua

Los sistemas actuales de producción de chile seco, tienen bajas eficiencias de producción y donde se aplican altos volúmenes de agua por hectárea, así tenemos que un productor medio, utiliza 10,000 m³/ha y produce alrededor de 1.6

ton/ha, en otras palabras se producen 0.16 kg de chile seco por cada m³ de agua o 16 kg/cm.

Aunado a lo anterior, las presiones por el agua disponibles cada vez serán mas fuertes entre los usuarios agrícolas, industriales y urbanos.

6.6.1.2. Metodología y resultados

En el Campo Experimental de Zacatecas del INIFAP, se estudió en el año de 2001, la respuesta del cultivo del chile seco a variaciones de la humedad en el suelo en etapas fenológicas y usando el método de riego por goteo. Para la aplicación de la cantidad de agua se usaron datos de evaporación de la tina Tipo "A" afectada por diferentes coeficientes (Kv) y las etapas fueron dos, inicio de formación de botones a formación de fruto verde (A) y formación de frutos verdes a fruto maduro (B). Los rendimientos del cultivo del chile como efecto de los tratamientos fueron afectados. De los análisis estadísticos aplicados se desprende que las etapas fenológicas A y B son estadísticamente significativas así como los tratamientos de los coeficientes de evaporación. En los Cuadros 6.15 y 6.16, se muestran por separado los efectos de las etapas fenológicas y de los tratamientos de evaporación.

Cuadro 6.15. Rendimientos medios en ton/ha de Chile seco por efecto de las etapas fisiológicas y los coeficientes de evaporación.

COEF. de Evaporación %	ETAPA A Rendimiento (ton/ha)	ETAPA B Rendimiento (ton/ha)
90	3.09a	3.05 ^a
60	2.99a	2.92 ^a
30	1.93b	2.04b

Nota: Valores de una misma columna con la misma letra, estadísticamente iguales (Duncan 0.01)

Cuadro 6.16. Rendimientos medios en ton/ha de Chile seco por efecto de los tratamientos del coeficiente de evaporación.

COEFICIENTE DE EVAPORACIÓN (%)	RENDIMIENTO (ton/ha)
60-60	3.49a
60-90	3.47a
90-90	3.28ab
90-60	3.21b
90-30	2.78c
30-90	2.41d
30-60	2.07e
60-30	2.02e
30-30	1.32e

Nota: Valores con la misma letra, estadísticamente iguales (Duncan 0.01).

Como resultado de los coeficientes de evaporación los cuales propiciaron diferentes regímenes de humedad en el suelo, se obtuvieron los mayores rendimientos con 60-60, 60-90 y 90-90 % de la evaporación, en la Etapa A y en la Etapa B respectivamente; y los menores con 30-30, 60-30 y 30-60. Esto se debe básicamente a la humedad residual que fue mayor con los primeros coeficientes que con los segundos. Estos resultados están de acuerdo con los encontrados en los trabajos de Mojarro (1999 y 2000).

Además, la etapa más sensible es la etapa A. Por ejemplo, las parcelas con los tratamientos 30-90 y 30-60 que indica que durante la etapa A (inicio de formación de botones a formación de fruto verde), los regímenes de humedad residual en el suelo fueron inferiores a la capacidad de campo, en otras palabras existió restricción de humedad en el suelo. Para después pasar a la etapa B (de formación de frutos verdes a fruto maduro) donde los valores de la humedad residual fueron muy cercanos a la capacidad de campo. Sin embargo las plantas de chile no respondieron en la producción de chile seco, a una segunda etapa con no restricciones de humedad en el suelo.

Lo que indica que el efecto del estrés de agua fue mas significativo, en la etapa A, que los procesos y mecanismos de la transpiración (mm/día) y la fotosíntesis (mg/día) se vieron disminuidos a tal grado que no manifestaron una recuperación en la etapa B, con mejores condiciones de humedad. Otro parámetro que ayuda a confirmar lo anterior, la perdida económica calculada, como se vera mas adelante, para la Etapa A por no aplicar el riego en el día y la lamina optima, se pierden 12.7 kg/ha de chile seco; y en la Etapa B = 10.75 kg/ha. Cuando el riego se desfaso 6 días para las dos etapas. Sobre este punto, Yaron (1971), Palacios y Martinez (1978), Mojarro (1991) y Stegma (1983) comentan que el objetivo del manejo del agua de riego es obtener rendimientos máximos, particularmente cuando el agua de riego es escasa. También estos investigadores encontraron que debido a los cambios de humedad en el suelo, se encontraron valores óptimos de la humedad en el suelo en determinadas etapas fenológicas de los cultivos, que producen rendimientos máximos.

Por otro lado, las parcelas que recibieron el riego con el criterio de 90-60 y 90-30, en la etapa A los valores de humedad residual fueron muy cercanos a la capacidad de campo; para después pasar a la etapa B a una condición de humedad residual

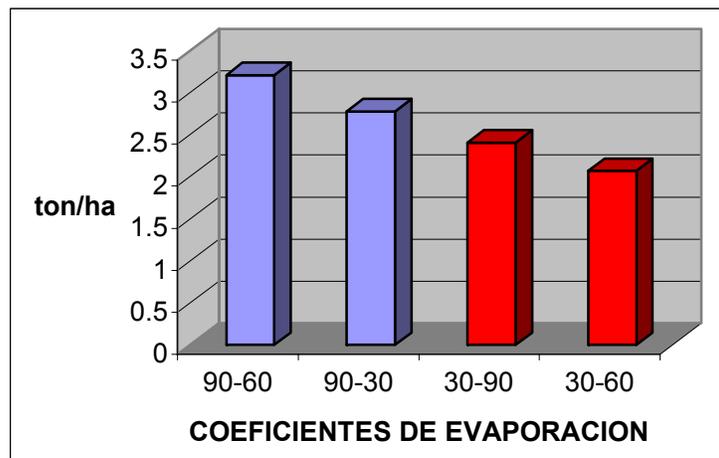


Figura 7.23. Rendimientos de los tratamientos de evaporación, en etapas fenológicas.

restringida. En esta segunda etapa, la planta de chile, autorreguló su mecanismos de transpiración y de fotosíntesis al manifestar en la cosecha un incremento del 26% de mas (Cuadro 6.16 y Figura 6.23), comparado con el primer ejemplo.

Lo anterior es confirmado si comparamos los rendimientos medios de chile seco entere 90-60, 90-30 y 30-90, 30-60, los dos primeros criterios de riego producen en promedio 755 kg/ha de mas que los segundos. En resumen, la etapa fisiológica más sensible a la falta de humedad en el suelo es la etapa de trasplante a formación de frutos verdes, que comprende aproximadamente 77 días.

6.6.1.3. Productividad del agua de riego

En la agricultura de riego son clásicas las preguntas de ¿Cuánto, cuándo y cómo regar?. Las dos primeras se refieren a la cantidad de agua que debe aplicarse a un cultivo y los intervalos de riego que permiten obtener un rendimiento óptimo económico; la tercera se refiere a la metodología de aplicación del agua que debe usarse para lograr una distribución uniforme en el suelo con una mínima pérdida de aplicación.

El concepto de función de producción se basa en la teoría sustentada por muchos autores de que el rendimiento de los cultivos es afectado por las variaciones del régimen de humedad en el suelo durante su desarrollo.

Flinn y Musgrave (1967), señalan que los cambios en el régimen de humedad del suelo durante el desarrollo de los cultivos, produce también cambios en el rendimiento de dichos cultivos, sobre todo si éste se mide como el fruto y no como la materia verde de la planta.

El rendimiento de un cultivo depende de muchos factores variables, algunos controlables como la preparación del suelo, la fertilización, el riego, etc., otros parcialmente controlables como las plagas y enfermedades y otros no controlables como son los factores atmosféricos, edáficos, etc. en forma general el rendimiento de un cultivo específico puede expresarse mediante una función como:

$$Y = f (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \dots, X_j, \dots, X_m) \quad \dots 6.12$$

Donde:

Y = Rendimiento del cultivo

X_j = Factor variable que influye en el rendimiento

Para investigar el efecto de determinados factores, pueden mantenerse varios factores variables, controlables, como constantes y asumirse alguna constancia de los factores no controlables. Bajo esta suposición, puede considerarse para fines de análisis, que el rendimiento de un cultivo depende solamente de la cantidad de agua consumida por él, antes del riego, en una etapa fisiológica determinada; por lo tanto, el consumo total de agua por el cultivo es función de las mismas variables, es decir:

$$ET = f (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, \dots, X_j, \dots, X_m) \quad \dots 6.13$$

Consecuentemente, se deduce que el rendimiento del cultivo es también una función del agua total evapotranspirada o consumida, o sea:

$$Y = f(ET) \quad \dots \quad 6.14$$

Por tanto, si la función anterior tiene un máximo, habrá un conjunto de valores X_i^* (óptimos) que maximizarán el rendimiento del cultivo para obtener Y^* y desde luego también habrá un ET^* (óptimo) que se obtendrá sustituyendo X_i^* .

Las técnicas de Optimización del recurso agua ya se han señalado por Palacios (1981) y Mojarro (1991), quienes comentan que el efecto de la cantidad y la oportunidad del riego en el rendimiento de los cultivos no es cosa sencilla. Ya que existe una interacción entre los componentes del sistema suelo-planta-clima, de manera que el agua almacenada en el suelo pasa a la atmósfera a través de la planta. La cuantía del flujo de agua en este proceso, depende básicamente de una demanda que la establecen los factores atmosféricos y por otra, de la oferta que depende de las características físicas y químicas del suelo y de su contenido de humedad, así como de las características fisiológicas de los cultivos.

Las respuestas a este proceso dinámico, las podemos encontrar en las funciones de producción del agua, funciones que relacionan el rendimiento de los cultivos con la variación de los niveles de humedad del suelo, como se vera mas adelante. Sin embargo, este tipo de relaciones han sido criticadas por el simple hecho que la respuesta encontrada es para un sitio y para tiempo dado, en otras palabras que no es posible su extrapolación.

Los rendimientos del cultivo del Chile, anteriormente citados, fueron analizados conforme a la metodología propuesta por Mojarro (1991) y Palacios (1981). Con la cual es posible encontrar los valores de la de humedad en el suelo que maximizan la productividad del agua de riego. Los rendimientos de chile seco de cada una de las parcelas fueron relacionados con los coeficientes de la evaporación que fueron aplicados en las dos etapas y la lámina de riego total. Se realizaron varios análisis de regresión, y se encontraron una serie de ecuaciones Posteriormente se determinaron las derivadas parciales y se igualaron a cero y se encontró los valores que maximizan los rendimientos. Además se determino por medio de la estrategia de inventario (Palacios 1978) la perdida económica por no regar con el criterio de los óptimos, como sigue:

$$Y = -2.35 + 7.34Kv_1 + 6.72Kv_2 - 5.34Kv_1^2 - 4.20Kv_2^2 \quad \dots \quad 6.15$$
$$R^2 = 0.90$$

$$Y = -19.75 + 1.04Et_1 + 0.102Et_2 - 0.0133Et_1^2 - 0.00097Et_2^2 \quad \dots \quad 6.16$$
$$R^2 = 0.90$$

Donde Y, son los rendimientos en ton/ha; Kv_1 coeficientes de evaporación en la etapa A; Kv_2 coeficientes de evaporación en la etapa B; Et_1 consumo de agua en la etapa A, en cm; y Et_2 consumo de agua en la etapa B, en cm. Los resultados anteriores difieren si para obtener la función se usa $Kv = 1 - Kv$ (fracción).

En la ecuación 6.15, se determinaron las primeras derivadas parciales, con respecto a cada una de las variables independientes, posteriormente se igualaron a cero, para encontrar los valores de Kv_1 y Kv_2 óptimos para cada etapa como criterio de regar el cultivo del Chile, con riego por goteo. Para obtener los valores óptimos se realiza el siguiente procedimiento:

$$\frac{\partial Y}{\partial Kv_1} = 7.34 - 10.68Kv_1 \quad y \quad \frac{\partial Y}{\partial Kv_2} = 6.72 - 8.4Kv_2 \quad \dots 6.17$$

$$\frac{\partial Y^2}{\partial Kv_1^2} = -10.68Kv_1 \quad y \quad \frac{\partial Y}{\partial Kv_2} = -8.4Kv_2 \quad \dots 6.18$$

Cuando las segundas derivadas de las variables son negativas, como es el caso, existe condición suficiente para esperar un valor máximo de esa variable.

Para encontrar los óptimos se igualan las funciones 6.17 a cero y de esta manera encontramos los valores de Kv_1 y Kv_2 . $Kv_1 = 0.55$ y $Kv_2 = 0.8$;

Donde;

$Kv_1^* = 0.55 = 60\%$, (60%) de la evaporación, durante el inicio de formación de botones a formación de fruto verde; y $Kv_2^* = 0.77 = 77\%$ (80%) de la evaporación, durante la formación de frutos verdes a fruto maduro.

Es mucho más relevante usar la Et (evapotranspiración del cultivo) que los coeficientes de evaporación, ya que la velocidad de Et (mm/día) es una variable que indica una cantidad de agua que se pierde en el proceso integral suelo-planta-clima y es un factor fisiológico a ser manipulado, por medio de practicas culturales (Mojarro 1991). En este estudio Et es igual al consumo de agua. Para encontrar los valores de Et^* que maximizan el rendimiento de Chile seco (Y^*), se hace uso de la ecuación 6.16, en la cual se determinaron sus derivadas parciales de cada una de las variables y se igualaron a cero, y se despejaron los valores de Et_1 y Et_2 , de tal forma que los valores que maximizan el rendimiento fueron:

$$Et_1^* = 38.0 \text{ cm, en la etapa A } y$$

$$Et_2^* = 58.0 \text{ cm, en la etapa B}$$

Sustituyendo los valores en 6.16, se tiene que $Y^* = 2.72$ ton/ha de Chile seco.

La productividad del agua, es la relación del producto medio y el producto marginal. Esto se logra dividiendo la ecuación 6.16 entre E_t e igualando a la primera derivada parcial de cada una de las variables de la misma ecuación, como sigue:

$$-19.7 / E_t + 1.048 - 0.0132E_{t_1} = 1.048 - 0.0266E_{t_1} \quad \dots \quad 6.19a$$

$$-19.7 / E_t + 0.102 - 0.00097E_{t_2} = 0.102 - 0.00194E_{t_2} \quad \dots \quad 6.19b$$

Resolviendo para $E_{t_1}^{**}$ y $E_{t_2}^{**}$, se tiene que los valores que maximizan la productividad del agua son:

$$E_{t_1}^{**} = 38.5 \text{ cm que se consumen en la etapa A}$$

$$E_{t_2}^{**} = 45.0 \text{ cm que se consumen en la etapa B}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 6.16, se tiene un rendimiento de $Y^{**} = 3.72$ ton/ha de Chile seco. Si sumamos las E_t^{**} en las dos etapas y lo dividimos por su producción Y^* y luego las E_t^{**} por su producción; se encuentra que la productividad del agua se incrementa como sigue:

$$Y^* / \sum_{n=1}^2 E_t^{**} = 2.72 / 96 = 28 \text{ kg / ha / cm} \quad \dots \quad 6.20a$$

$$Y^{**} / \sum_{n=1}^2 E_t^{**} = 3.72 / 83.5 = 44.5 \text{ kg / ha / cm} \quad \dots \quad 6.20b$$

En otras palabras se producen 16.5 kg/ha/cm de chile seco de más. También se encontró una relación entre la $E_{t_1+t_2}$ y los coeficientes de evaporación K_v , de la siguiente forma:

$$E_t = 28.33 + 19K_{v_1} + 57.33K_{v_2} \quad \dots \quad 6.21$$

sustituyendo los valores de E_t^{**} para cada etapa, y resolviendo parcialmente para K_{v_1} y K_{v_2} , los valores $K_{v_1}^{**}$ que maximizan la productividad son:

$$K_{v_1}^{**} = 47\%$$

$$K_{v_2}^{**} = 77\%$$

Hasta aquí se han definido algunas estrategias para encontrar los criterios de la oportunidad del riego y la cantidad de agua que consume el cultivo en sus etapas fenológicas, que maximizan la producción del cultivo de Chile seco y los criterios para maximizar la productividad del agua.

El siguiente paso, es el de encontrar la pérdida económica por no dar los riegos con los criterios encontrados, en oportunidad y en cantidad. Si tomamos de los datos de campo los valores medios de Et_1 (cm/día), Et_2 (cm/día), Lr (lamina de riego en cm) y los valores de Kv_{1y2}^* , se tiene lo siguiente:

$$NDR = (X - X^*) / Et \times Lr$$

donde NDR, es el número de días óptimos que deben de pasar entre un riego y el siguiente; X es el coeficiente de evaporación al 100%; X^* es el coeficiente de evaporación óptimo %.

Sustituyendo valores para la etapa B, si $Et = 1.2$ cm/día; y $Lr = 4.5$ cm.

$$NDR = (100 - 80^*) / 1.2 \times 4.5 = 3.7 \text{ dias}$$

En la etapa A, con $Et = 0.9$ y $Lr = 3.5$ el criterio del riego en la practica fue de 4 días.

Por lo tanto la pérdida económica (PE) por no regar con los valores que maximizan la productiva del agua, se calcula como sigue:

$$PE = b_2 * [Et^2 / Lr^2] * d^2 \quad \dots 6.23$$

donde b_2 es el coeficiente de segundo grado de la variable Kv en la ecuación 6.15 y d^2 son los días en que se desfasó el riego.

Suponiendo que en las dos etapas se desfaso el riego 6 días del óptimo, por lo tanto la pérdida económica para la Etapa A = 12.7 kg/ha de Chile seco; y la Etapa B = 10.75 kg/ha. Estos últimos cálculos también confirman que la etapa A es mucho mas sensible al déficit de humedad en el suelo, que la etapa B.

Dan Yaron (1963), comenta que para que los resultados de las funciones de producción del agua pudieran ser extrapolables es conveniente repetir el experimento en por lo menos 5 años. Con el objeto de que la metodología pudiera tener algo más de sustento, se consideró aplicarla a los resultados de otros años, donde el criterio usado para calcular el volumen de agua a reponer, fueron los coeficientes de evaporación con el riego por goteo (Mojarro 1999 y 2000). Se procedió a utilizar los resultados de tres años consecutivos los rendimientos y los consumos de agua, y aplicar la metodología anteriormente discutida. Las ecuaciones fundamentales encontradas fueron las siguientes:

$$Y = -0.709 + 0.0889Kv - 0.000528Kv^2 \quad \dots \quad 6.24$$

$$R^2 = 0.70$$

$$Et = 29.65 + 0.606Kv - 0.0000756Kv^2 \quad \dots \quad 6.25$$

$$R^2 = 0.75$$

Aplicando la metodología se encontraron los valores que se muestran en el Cuadro 6.17

Cuadro 6.17. Valores obtenidos con resultados de tres años de producción de chile en el Campo Experimental Zacatecas.

VARIABLE	VALORES OPTIMOS
Kv*	92% de la evaporación
Et*	81 cm de lamina total de riego
RENDIMIENTO*	3.02 ton/ha
PRODUCTIVIDAD*	37.2 kg/cm
Kv**	60% de la evaporación
Et**	64 cm de lamina total de riego
PRODUCTIVIDAD**	47.1 kg/cm
PERDIDA ECONOMICA, CON LOS CONSIDERANDOS DEL APARTADO	PERDIDA = 22 kg/ha de Chile seco por no dar el riego oportuno

Está claro que la metodología aquí presentada propicia ventajas para la toma de decisión de los productores al definir varios escenarios para resolver “cuando” y “cuanto” regar el cultivo del chile para obtener alta productividad del agua y de los rendimientos de chile seco. Además, si el productor continua extrayendo del acuífero los 10,000 m³/ha el costo de la energía eléctrica será de \$3,000.00, pero si se extrae solo la cantidad de agua que el cultivo esta demandando (6400 m³/ha), solo invertirá \$1,800.00.

6.7 LITERATURA CITADA

Aguilera, C. y R. E. Martínez. 1996. Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Arriaga Z. R. 1999. Guia para Cultivar Guayaba. Fundación Produce Michoacan, A. C.

Barnes, K. D. 1983. Managing root systems for efficient water use: Breeding plants for Efficient water use. In Limitation to Efficient Water Use in Crop Production. Taylor H. M. Jordan W.R., and Sinclair T. R. (Eds)

Baumann, D. D.; Boland, J. J.; Sims, J. H., (1980). "The Problem of Defining Water Conservation". The Cornett Papers. University of Victoria, Victoria B.C., pp. 125-134.

Biscoe, P. V. and Gallaher N. J. 1977. Weather, Dry Matter Production and Yield: In Environmental Effects on Crop Physiology. Academic Press. N. Y.

Bravo A.G. L. y J.L.C. Chan. 1987. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera del maíz de riego en zonas semiáridas. Rendimiento de grano. TERRA, 5 (2): 132-139.

Bravo L.A.G. y Echavarría Ch.F. 2003. Aplicación de fertilizantes nitrógeno, fósforo y Potasio en fertirriego en ajos (*allium sativum* L.) en Zacatecas, México. XII CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN. Zacatecas, México.

Bulloch, J. and Darwish, A. 1993. Water wars: Coming conflicts in the Middle East. London, Victor Gollancz, 199 p.

Campbell, G.S. 1977. An introduction to environmental biophysics. Springer-Verlag, New York.

Catalán V. E. A. 1990. Hidráulica del riego por gravedad. In: L.F. Flores L., A. Lagarda M., C. Godoy A., R. Jasso I. e I. Sánchez C. (eds). Metodología de investigación y diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. CENID-RASPA. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Gómez Palacio, Dgo.

Chan C. J.L., A.G. L. Bravo. y F.J. M. Flores. 1987. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera del frijol de riego en zonas semiáridas. Rendimiento de grano. TERRA, Vol. 5 N° 2. pp 126-131.

Chang, J.H. 1968. Climate and agriculture. An ecological survey. Aldine Publishing Company. Chicago, USA.

Charles-Edwards, A. D. 1982. Physiology determinants of crop growth. Academic Press. pp 158.

Clark G., A. 1992. Drip irrigation management and scheduling for vegetable production. HortTechnology. 2 (1).

Comisión Nacional del Agua. 2001. Programa Nacional Hidráulico 2001-2006.

Comisión Nacional del Agua. 2002. Plan nacional hidráulico 2002-2006.

Cumpa R., J.S., Palacios V.E. y Exebio G.A. 1988. Efecto del déficit de humedad y características físicas del suelo en el desarrollo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agrociencia* 73: 195-215.

Derner, J.D., H.B. Johnson, B.A. Kimball, P.J. Pinter Jr., H.W. Poley, C.R. Tischler, T.W. Bouton, R.L. Lamorte, G.W. Wall, N.R. Adam, S.W. Leavitt, M.J. Ottman, A.D. Matthias y T.J. Brooks. 2003. Above and below ground responses of C₃ - C₄ species mixtures to elevated CO₂ and soil water availability. *Global Change Biology*. 9, 452-460.

Denmead, O.T. y R.H. Shaw. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54: 385-390.

Doorenbos, J. y A.H. Kassam. 1986. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje No. 33. Roma, Italia.

Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Irrigation and drainage. Paper No. 24. (REV.) 156 p. FAO. Roma, Italia.

Economist. 1988. Dirt poor: A survey of development and the environment. *Economist*, Mar. 21, p. 3-16.

Falkenmark, M., Lundqvist, J., And Widstrand, C. 1999. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. *Natural Resources Forum* 13(4): 258-267. Nov. 1989.

FAO. 2000. Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación. Roma. <http://www.fao.org.mx>

FAO. 2003. Descubrir el potencial del agua en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. http://www.fao.org/agl/aglw/docs/unlocking_s.pdf

Fernández-Jáuregui, C. A. 1999. *El agua como fuente de conflictos: repaso de los focos de conflictos en el mundo*. Revista CIDOB d'afers internacionals. 1999. Núm: 45 - 46 Agua y desarrollo (p. 179-194)

Fimbres, F.A. y Lagarda M.R. 1985. Optimización del sistema de riego por goteo en vid (*Vitis vinifera* L.) en la región de Caborca. *Agric. Tec. Mex.* 11 (1): 51-56.

Flinn, J. C and Musgrave, W. F. 1967. Development and Analysis of input-output Relation for Irrigation Water. *The Australian Journal of Agricultural Economics.* 11. (1): 1-20.

Gallagher, J. N. and Biscoe, P. V. 1978. Radiation, absorption, growth and yield of cereals. *J. Agri. Sci., Cam.* 91:47-60.

García B., J. 1979. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y su posterior zonificación. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

García, R. J. 1986. Spectral Reflectance Estimates of Total Above Ground Phytomass Production and Photochemical Efficiency of Conversion in Wheat Under Different Nitrogen Regimes. M.S. Thesis Kansas State University.

Godoy A, C., Torres E. C.A., Reyes J.I., López M.I. 1999. Sistemas de irrigación y eficiencia en el uso del agua. Informe de Investigación. CIFAP Comarca Lagunera. pp: 70-75

Godoy A. C. y Mejía L.J.R. 2000. Manejo del Fertirriego en Tomate, Chile Y Melón. Manual Técnico No. 1. Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10. Torreón, Coahuila.

González V. M. A. 2003. Capacitación, transferencia de tecnología y consolidación de la transferencia de Distritos de Riego. XII Congreso Nacional de Irrigación, Zacatecas, Zac., México.

Hidalgo G. A. 1971. Métodos modernos de riego por superficie. Aguilar, S.A., Madrid.

Hsiao, y Xu. 2000. Predicting Water Use Efficiency of Crops. *ISHS Acta Horticulturae* 537: [III International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops](#)

IMTA. 1997. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Comisión Nacional del Agua.

Jasso I. R. y Ramírez Contreras C.E. 1990. Algoritmo para estimar la evapotranspiración real. In: L.F. Flores L., A. Lagarda M., C. Godoy A., R. Jasso I. e I. Sánchez C. (eds). Metodología de investigación y diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. CENID-RASPA. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Gómez Palacio, Dgo.

Juma, C. 1988. The CBD and the biological diversity of inland waters. Presented at the International Conference of Water and Sustainable Development, Paris, Mar. 19-21, p. 1-4.

Kanemasu T, Piara S. and Chaudhuri U. 1984. Water Use and Water Use Efficiency of Pearl Millet and Sorghum. Agrometeorology of Sorghum and Millet in the Semi-Arid Tropics, Proceeding of the International Symposium.

Kijne, J.W., Molden, D. & Barker, R. (Eds). 2003. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Series, No. 1. Wallingford, UK, CABI Publishing.

Kraemer, D. 1988. Integrated information management and the utilization of hydrological data. Presented at the International Conference of Water and Sustainable Development, Paris, Mar. 19-21, 1998. p. 1-9.

Kumar D. y L.L. Tieszen. 1980. Photosynthesis in *Coffea arabiga*. II. Effects of water stress. Exp. Agr. 6: 21-27.

Linacre, E.T. 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. Agric. Meteorol. 18: 409-242.

Lira S., R.H. 1986. Desarrollo de la investigación sobre evapotranspiración. In: R.H. Lira S. y L.F. Flores L. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos – Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste - PRONAPA. Gómez Palacio, Dgo.

López, J. R., Hernández, J.M., Pérez R.A., y González H. J.F. 1992. Diseño y manejo de un sistema de riego localizado. pp. 149-158. In: Mundi Prensa (ed.). Riego Localizado. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid, España.

Luna S.J.C. 2003. Agua: Factor de seguridad nacional y armonía social. XII Congreso Nacional de Irrigación, Zacatecas, Zac., México.

Ludlow, M.M. 1970. Effect of oxygen concentration on leaf photosynthesis and resistances to carbon dioxide diffusion. Plant 91: 285–290.

Marinato M., R. y Palacios V.E. 1979. Relaciones entre potencial del suelo y de la hoja y su efecto en la evapotranspiración del cultivo de trigo. Agrociencia 38: 53-63.

Mckibben, B. 1998. A special moment in history. Atlantic Monthly, May 1998. p. 55-78.

Merla, A. 1988. A Commitment to the global environment: The role of GEF and international waters. Presented at the International Conference of Water and Sustainable Development, Paris, Mar.19-21, 1998. p. 1-3.

Mojarro D. F. 1988. Analyses of the Effects of Water, Nitrogen, and Weather on Growth, Grain Yield, Biomass Production and Ligth Use Efficiency of Wheat, Ph. D. Thesis, Kansas State University.

Mojarro D., F. 1990. Evapotranspiración y requerimientos hídricos por los cultivos. In: L.F. Flores L., A. Lagarda M., C. Godoy A., R. Jasso I. e I. Sánchez C. (eds). Metodología de investigación y diagnóstico en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. CENID-RASPA. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias - Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Gómez Palacio, Dgo.

Mojarro D., F. y Palacios V.E. 1979. Ajuste de las funciones de Jensen-Haise, Horton y Norero para la estimación de la evapotranspiración. *Agrociencia* 38: 77-87.

Mojarro, D. F. 1999. Riego de cultivos y fertirrigación. INIFAP-CALERA. Inédito. Campo Experimental Zacatecas. Documento de circulación interno.

Mojarro, D. F. y Escobedo. R. S. 1988. Practicas de conservación de la humedad en el cultivo del guayabo. Informe Técnico. Inifap. Campo Experimental Zacatecas. Documento de circulación interno.

Mojarro D.F. 1977. Efectos de la Sequía en el Rendimiento del Frijol. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Mex.

Mojarro, D. F. 1991. Funciones de producción del agua y su aplicación en el riego. Seminario Internacional Sobre el Uso Eficiente del Agua. México, D. F.

Mojarro D. F. 2000. Efecto del riego por goteo-cintilla en la respuesta de la secadera de chiles de tipo ancho y mirasol. Reporte técnico. Campo Experimental Zacatecas. Documento de circulación interno.

Monteith, J.L. 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9:747.766.

Norero Sch. A. 1976. Evaporación y transpiración. Serie suelos y clima No. SC-13. CIDIAT. Mérida, Venezuela.

ONU. 1995. Cambio Climático. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas (PICC).

Ortiz S.C.A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa. Con aplicaciones en la república mexicana. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

Palacios. V. E. 1981. Introducción a la Teoría de la Operación de Distritos y Sistemas de Riego. Centro de Hidrociencias Colegio de Postgraduados.

Palacios V. E. y Fernández G. R. 1972. Estimación de los requerimientos de riego para nuevos proyectos. Ponencia en el Simposium Internacional para el Desarrollo de Recursos Hidráulicos. México.

Palacios V. E. 1975. Productividad, ingreso y eficiencia en el uso del agua en los distritos de riego en México. Riego y Drenaje. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.

Palacios V., E. 1980. Estimación de los requerimientos de agua de los cultivos para conocer el cuando y cuanto regar. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

Palacios V. E y Martínez G. A. 1978. Respuestas de los Cultivos a Diferentes Niveles de Humedad del Suelo. Colegio de Postgraduados. Riego y Drenaje.

Penman, H.L. 1948. Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass. Proc. R. Soc. London Ser. A. 193: 120-145.

Phene, C.J. 1999. Producción de alfalfa con riego por goteo. Memorias del 1^{er} Simposium Internacional de Irrigación y Nutrición Vegetal. León, Guanajuato, México. Julio 15-17: 75-83.

Poblete D. S., F. D. Mojarro, J. A. N. Gutiérrez, B. M. De León, J. A. G. Guillén y M. J. E. Montiel. 2003. Experiencia de sensibilización en el uso del agua en el D.R. 034, Zacatecas

Postel, S. 1996. Sharing the rivers. People and the Planet 5(3): 6-9. 1996.

Renault, D. & Wallender, W.W. 2000. Nutritional water productivity and diets: from 'crop per drop' towards 'nutrition per drop'. Ag. Wat. Man., 45: 275 – 296.

Rendón D. M. L. E. 1997. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec Morelos, México. pp 1-77 a 1-89 y 1-41 a 1-47

Ritchie, J. T. 1983. Efficient Water Used in Crops Production: Discussion on the Generality of Relation between Biomass Production and Evapotranspiration. In Taylor H. M. Jordan W.R., y Sinclair T. R. (Eds). Limitation to Efficient Water Use in Crop Production.

Rosenberg, N.J. 1974. Microclimate. The biological environment. John Wiley. New York.

Rumayor R. A. y Bravo L.A. 1991. Effects of three systems and levels of irrigating apple trees. *Scientia Horticulturae*, 47 (1991) 67-75.

Sánchez S. R. J. 2002. Concepto de evapotranspiración. Utilidad. Unidades. Dpto. de Geología, Univ. Salamanca. www.web.usal.es/~javisan/hidro

Stegman, C.E. 1983. Irrigation Options to Avoid Critical Stress: Irrigation Scheduling-Some Applied Concepts. In Taylor, Jordan and Sinclair (Eds). *Limitation to Efficient Water Use in Crop Production*.

Suresh, V. 1998. Strategies for sustainable water supply for all: Indian experience. Presented at the International Conference of Water and Sustainable Development, Paris, Mar. 19-21, 1998. p.1-8.

Tate, D. M. (1991). 'Principios del Uso Eficiente del Agua'. En: *Seminario Internacional sobre Uso Eficiente del Agua*. México.

Taylor M. H., Jordan R. W and Sinclair R. T. 1983 (Editores). *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. Capítulos 1B, 8A, 9A y 10A.

Tijerina Ch. L. 1986. Determinación de la evapotranspiración de cultivos anuales en el Valle de México. In: R.H. Lira S. y L.F. Flores L. (eds). *Lisimetría. Estudios de evapotranspiración*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos -Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias -Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste - PRONAPA. Gómez Palacio, Dgo.

Tijerina Ch. L. 1992. *Uso eficiente del agua en unidades de riego para el desarrollo rural*. Diplomado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Tijerina Ch. L. 1999. Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de Fertirrigación. *TERRA* 17 (3)

UNESCO. 1997. ¿Hay suficiente agua en el mundo?. Organización Meteorológica Mundial/Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. OMM-Nº 857

Van Keulen H and Wolf J. 1986. *Modeling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops* (Eds). Capitulo 3. *Crop Production as Determined by Moisture Availability*.

Velásquez V. M. A y Orduña J. B. 1984. Determinación del Calendario de Riego y de los Requerimientos de N-P-K en el Cultivo del Guayabo. *Informes de Investigación 1981-1984 CIANOC*.

Velásquez V. M. A y Padilla R. S. 1983. Determinación del Abatimiento Optimo de Humedad del Suelo en el Cultivo de la Guayaba. *Informes de Investigación 1981-1984 CIANOC*.

Velasco M. H. 1983. La Evaporación: fenómeno adverso al habitante del semidesierto mexicano. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Veihmeyer, F.J., y Hendrickson, A.H. 1950. Soil moisture in relation to plant growth. [Annual Review of Plant Physiology](#). Vol. 1: 285-304

Verastegui C. J. y Bravo L. A.G.. 1986. Efecto de niveles de riego por goteo en dos etapas fonológicas en la producción de la vid en Zacatecas. *TERRA*. 4 (2): 132-136

Villaman P. R., Tijerina Ch,L., Quevedo N.A. y Crespo P.G. 2001. Comparación De Algunos Métodos Micrometeorológicos Para Estimar La Evapotranspiración, En El Area De Montecillo, México. *TERRA* 19 (3)

Yaron. D.1963. Economic Analysis of Input-Output Relations in Irrigation. Transaction of the Fifth Congress in Irrigation and Drainage. IDIC. Vol. III. R2. Question 16.

Yaron, D. 1971. Estimation and Use of Water Production Functions in Crops. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. Procc. Of ASCE. IR2. Jun, p 291.

Zegbe D. J.A., Mena C.J. , Rumayor R. A.F., Reveles T. L.R., y Medina G.G. 2005. Prácticas culturales para producir durazno criollo en Zacatecas. *Campo Experimental Zacatecas*. Centro de Investigación Norte Centro. INIFAP.

7. OPERACIÓN DE LAS PRESAS EN TIEMPOS DE SEQUÍA. Uso del *SPI* como herramienta para caracterizar la sequía en cuencas

Dr. Francisco Mojarro Dávila
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias
fmojarro@inifapzac.sagarpa.gob.mx

Dr. Israel Velasco Velasco
Especialista en Hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

J. A. Gutiérrez Nava
Estudiante del programa
Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos
Universidad Autónoma de Zacatecas

J. Natividad Barrios Domínguez
Profesor-Investigador
Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos
Universidad Autónoma de Zacatecas

7. OPERACIÓN DE LAS PRESAS EN TIEMPOS DE SEQUÍA. Uso del *SPI* como herramienta para caracterizar la sequía en cuencas

Francisco Mojarro Dávila
Israel Velasco Velasco
J. A. Gutiérrez Nava
J. Natividad Barrios Domínguez

7.1 INTRODUCCIÓN

El problema de establecer la dotación de agua por uso y/o usuario se resume en encontrar el punto de equilibrio entre dos posiciones literalmente divergentes: la de los usuarios, interesados en disponer del máximo de agua en el tiempo presente, prestando poca atención al futuro; y por otra parte, la posición de CNA como responsable de la administración del recurso a mediano y largo plazos, es decir, de su permanencia y regularidad para hacer posible la sustentabilidad.

Parte de la solución al problema puede plantearse al establecer políticas de operación adecuadas de los embalses, considerando las condiciones de escasez, así como de las aguas subterráneas, donde éstas predominen, o bien de una política operativa conjunta.

Así, en términos de hacer menos escabroso el proceso de asignación, si éste se divide en dos fases claramente definidas, es probable que se facilite y se acepte de mejor manera la decisión final. Esto significa que en la primera fase debe haber una asignación sectorial, definida y decidida por la institución rectora del recurso (CNA), con la participación de las dependencias e instituciones relacionadas al mismo (SAGARPA, SEMARNAT, gobiernos estatales y municipales, ONG's, principalmente), y con los representantes de cada sector (agrícola, industrial, doméstico-urbano, ambiental, ganadero). Esto daría por resultado la asignación global en bloque de los volúmenes de agua correspondiente a cada sector, acorde con un balance general de la disponibilidad y de las expectativas a corto y mediano plazos del comportamiento hidrológico.

La segunda fase es la asignación de volumen (dotación) a cada usuario dentro del sector correspondiente. En el caso del uso agrícola, la propuesta de asignación la hace CNA por medio del DR, para analizarla, negociarla y en su caso definirla y aprobarla con los representantes de los usuarios organizados en las AU. Es aquí donde se define y decide cuánto y cómo será el uso del agua subterránea, en complemento de la superficial, así como de la cédula de cultivos, tomando en consideración los criterios ya mencionados: mercado, generación de empleos, requerimientos de otros insumos y créditos. Es, con mucho, la fase más difícil, ya que se tiene que afrontar la posibilidad real de afectar los ingresos directos de los usuarios por su actividad.

En cuanto al agua superficial, sólo las dos presas, Ing. Julián Adame Alatorre y El Chique, son las fuentes de suministro, con aguas de escurrimiento del río Juchipila. Eventualmente se dispone de pequeños volúmenes adicionales provenientes de las aguas de retorno y de drenaje de la zona de riego del módulo 4 que sirven para regar algunas superficies de la zona de riego del módulo 5, aunque su alcance sea limitado.

Las políticas de operación de estas presas usualmente se obtienen mediante simulación y funcionamiento de vaso. Estos son procesos en los cuales por aproximaciones y de acuerdo con la experiencia de los operadores se obtiene una política que puede ser adecuada. Aunque no siempre se logre la mejor, es útil para los efectos de suministrar una demanda, sobre todo cuando *no* hay escasez de agua y su uso se puede programar con cierta relajación. Éste aspecto de discrecionalidad en el suministro del agua en épocas de no escasez tiene el efecto de crear y fomentar el hábito entre los usuarios de siempre habrá agua suficiente en las presas para cubrir sus demandas. Se quedan con la idea de que aún en periodos de baja lluvia y aportación, pueden excederse en la demanda más aconsejable, ya sea sembrando mayor superficie de la autorizada (que no reportan) o haciendo un uso poco eficiente del agua suministrada.

Lo primero es lo que popularmente se conoce en el medio como tener sembradas “hectáreas grandes”, o sea superficies excedidas que una vez plantadas, se les debe dar el agua necesaria, aunque ello amerite una sanción. No obstante, en muchos casos, la sanción económica es mínima comparada con la ventaja de tener el agua.

En la medida en que el uso del agua es más competido y la demanda crece, la disponibilidad relativa decrece, y los periodos de baja aportación tienen un efecto adicional que aumenta las condiciones críticas para suplir los requerimientos. En estos casos, es necesario mejorar el proceso de asignación y extracción de los volúmenes requeridos. Es decir, se debe mejorar la administración del recurso, desde su fase de planeación hasta la entrega de los volúmenes a los usuarios. Bajo estas condiciones, obtener una política óptima se convierte en una necesidad y conveniencia que ayuda a mejorar el proceso de asignación.

Se entiende por “política de operación” de una presa el conjunto de reglas que definen la forma de operar un almacenamiento; mediante estas reglas se estima el volumen a extraerse en determinado periodo, de acuerdo con las condiciones de la oferta y la demanda (Wagner *et al*, 1996). En consonancia con esto, las políticas de operación pueden ser malas, regulares, buenas y “óptimas”, dependiendo de su eficiencia en satisfacer las demandas y en lograr la sustentabilidad del sistema.

Así, es usual que cuando las cosas no resultan bien en referencia a la operación de los embalses, se dice que se debe a una mala política, y son usualmente los operadores (la institución, CNA) los que cargan con la culpa. En el caso del riego, CNA tiene la responsabilidad de planear y diseñar las políticas operativas “buenas” a nivel de cuenca o sistema en aras del bien común y con visión más amplia que el periodo inmediato, pero las presiones de los usuarios por obtener más agua, lo que frecuentemente logran, es precisamente lo que conduce a una operación deficiente, ya que desvirtúa la buena planeación de origen. Entre otras razones, esto se da por la carencia o relajación en los reglamentos o en los instrumentos normativos o reguladores del funcionamiento de los sistemas de riego.

Una política de operación óptima es el resultado de una solución óptima del modelo matemático con que se resuelve, aunque no necesariamente corresponde a la solución óptima del sistema real (Collado, 1998). En este sentido, premisas diferentes en la función objetivo y en las restricciones conducen a resultados también diferentes, aunque todos óptimos (si existen), y queda a juicio del planeador cuál o cuáles son adecuadas para determinado sistema. Cabe aclarar que al usar un determinado método o modelo para obtener políticas óptimas, aunque los principios son los mismos, las particularidades del sistema real hacen que cada solución sea “a la medida”; no obstante, ninguna política óptima tiene una solución única.

7.2. POLÍTICA DE OPERACIÓN EN FUNCIÓN DEL ESCURRIMIENTO ANTECEDENTE Y DEL ALMACENAMIENTO ACTUAL

El cálculo de las políticas de operación óptimas es un proceso complicado y laborioso, por las numerosas variables, y la gran cantidad de restricciones que se deben cumplir simultáneamente. Una de las maneras de hacerlo es mediante *programación lineal*, posiblemente la menos complicada.

Los principios de una política óptima de operación con programación lineal se resumen en maximizar las extracciones de la presa, y al mismo tiempo minimizar los derrames, como función objetivo, sujetándose a diversas restricciones. El planteamiento general es:

$$\max \left\{ \sum_{t=1}^n R_t - \sum_{t=1}^n \sum_{j=1}^{12} D_{j,t} \right\}$$

Como *función objetivo*, donde:

n es el número de años del horizonte de modelación (dato)
 t es el subíndice secuencial del número de años del registro hidrométrico (dato)

j es el subíndice cíclico de los meses en cualquier año t (dato)

R_t es el volumen de extracción del año t (variable de decisión)

$D_{j,t}$ es el derrame de la presa en el mes j del año t (variable de decisión)

Y las restricciones son

Por continuidad:

$$S_t + Q_t - R_t - L_t = S_{t+1}$$

Donde

S_t es el almacenamiento al inicio del periodo t

Q_t es el volumen aportado al vaso en el periodo t

L_t es la pérdida (principalmente por evaporación) en volumen del vaso en el periodo t

Por estacionalidad: suponer que el periodo (muestra) de registro y modelación es estadísticamente representativo y repetitivo de la población a la que pertenece

$$S_{1,1} = S_{1,n+1}$$

Donde $S_{1,n+1}$ es el almacenamiento en el mes 1 del año $n+1$, inicio de la siguiente serie histórica.

Por capacidad de almacenamiento útil: es el volumen extraíble del embalse, a partir del nivel de aguas mínimo (NAMIN) y hasta alcanzar el nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO): $K_a = \text{NAMO} - \text{NAMIN}$.

$$S_{j,t} \leq K_a \quad \forall j, t$$

Por límites de asignación, si se plantean: volúmenes mínimo y/o máximo a extraer anualmente para cumplir determinado nivel o máximo de demanda, o bien por capacidades físicas de las obras de conducción y distribución.

$$R_t \leq V_{max} \quad \forall t$$

$$R_t \geq V_{min} \quad \forall t$$

Al inicio del periodo de asignación, se tiene que el volumen almacenado disponible está en función de las extracciones que se hayan hecho en el periodo anterior, y particularmente de los volúmenes aportados en ese mismo ciclo. Ello implica una restricción adicional:

Por el comportamiento hidrológico del período $t-1$:

En los distritos de riego, la forma real de operar es variable dependiendo de la disponibilidad de agua. Si ésta es abundante, puede regarse durante más tiempo, es decir, extender el periodo de extracción, mientras que si hay escasez, lo común es que haya un desfase temporal de extracción del agua, así como modificaciones en cuanto a la distribución proporcional mensual de la demanda. Así, dependiendo de las condiciones hidrológicas del año $t-1$ que se reflejan en los volúmenes disponibles al inicio del año t , la asignación planeada tendrá características distintivas. Así, para efectos de simplicidad, por conveniencia y a la vez de distinción entre los años secos, medios y húmedos, al registro de valores anuales de aportación se le da un ordenamiento de forma creciente, y se divide en tres partes con *igual* número de datos: el primer tercio, al percentil 33, son los años secos; del percentil 34 al 66 son los años medios o "normales"; y del percentil 67 al 100 corresponden los años húmedos. Así, el volumen de aportación al percentil 33 es V_1 , y al 66 es V_2 .

La extracción anual óptima en función de la aportación en $t-1$ se expresa como:

$$R^*_{Q_{t-1}} = \alpha + \beta_1 Q_{t-1}, \quad \text{si } Q_{t-1} V_1$$

$$R^*_{Q_{t-1}} = \alpha + \beta_1 V_1 + \beta_2 (Q_{t-1} - V_1), \quad \text{si } V_1 Q_{t-1} V_2 \quad \text{y}$$

$$R^*_{Q_{t-1}} = \alpha + \beta_1 V_1 + \beta_2 (V_2 - V_1) + \beta_3 (Q_{t-1} - V_2), \quad \text{si } V_2 Q_{t-1}$$

es el valor límite inferior de $R^*_{Q_{t-1}}$, en donde inicia la operación; teóricamente es el valor mínimo a asignar, para cualquier valor de la aportación Q_{t-1} . Las i son las pendientes de las líneas que definen la política de operación: i_1 para el primer cuantil (1 a 33, valores bajos de aportación anual, años secos); i_2 para el segundo cuantil, 34 a 66, valores medios anuales; y i_3 para el tercer cuantil, 67 a 100, que representan los valores más altos de aportación anual (años húmedos).

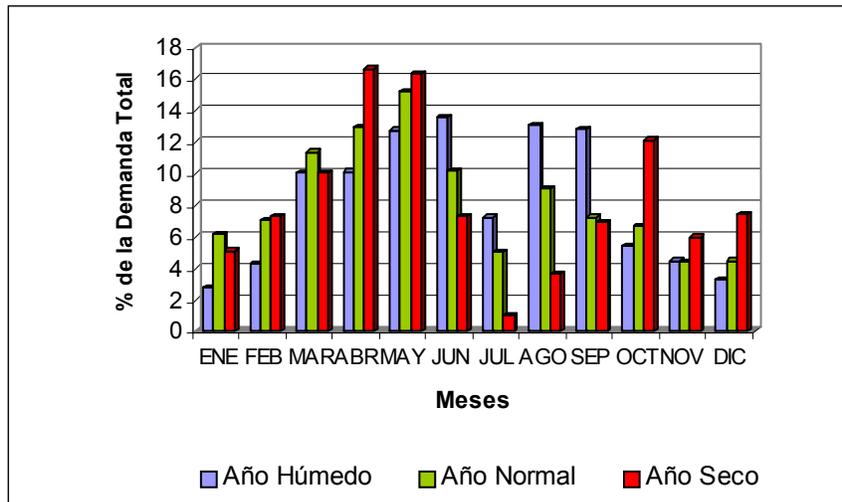


Figura 7.1. Distribución porcentual mensual de los volúmenes de extracción para riego, Presa Ing. J. Adame.

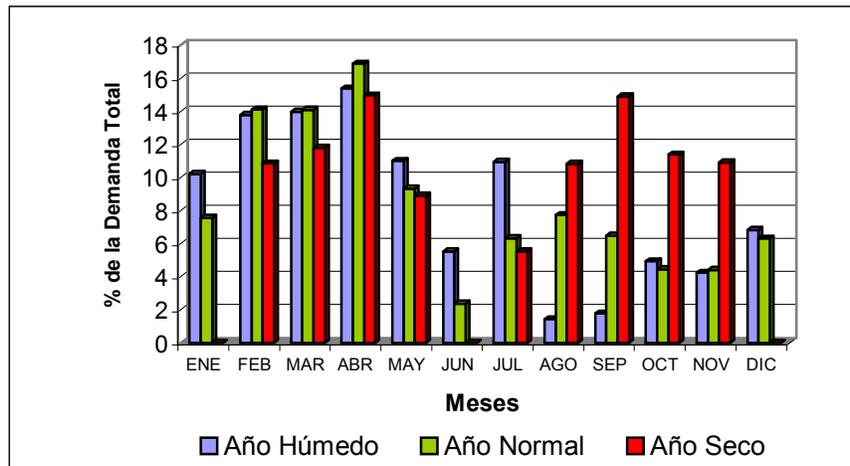


Figura 7.2. Distribución porcentual mensual de los volúmenes de extracción para riego, Presa El Chique.

Por otro lado, del volumen almacenado al tiempo de hacer la planeación, se puede especificar una proporción a asignarse en el año, que está en función del valor de la demanda y de los compromisos a satisfacer, así como en términos del pronóstico de comportamiento del año que empieza, y de la presión de los usuarios por obtener más agua; en suma, es una medida del riesgo o correr si el panorama no es bueno o no mejora en el siguiente año. Así, esta fracción de la asignación simplemente se expresa como:

$$R_{s,t}^* = \mu \bullet S_t$$

Donde: $0.2 \leq \mu \leq 0.8$

0.2 es cuando muy poco (20%) del volumen almacenado se compromete, y 0.8 es cuando el pronóstico es tan optimista que se esperan aportaciones altas durante t , y por tanto, se puede comprometer hasta el 80% del volumen almacenado al inicio.

Bajo estos conceptos, la extracción óptima anual total se expresa como:

$$R_t^* = R_{Qt-1}^* + R_{St}^*$$

La distinción entre años secos, medios y húmedos tiene la implicación siguiente: en las áreas de temporal, un año es bueno hidrológicamente, si las lluvias son abundantes durante el periodo de desarrollo de los cultivos, aunque en el resto del año la lluvia sea incluso menor que la normal. Es decir, el año es bueno cuando la humedad ocurre precisamente cuando se requiere.

En las áreas de riego, un año bueno es el que *precede* al año en que se aplicará el agua, es decir, el agua captada en un año se usará en el siguiente; por tanto, el año $t-1$ es el que se considera seco, medio o húmedo, respecto al año t , lo que se refleja en el almacenamiento al finalizar $t-1$ e iniciar t . Así, si $t-1$ es húmedo, t podrá tener otra condición, pero lo almacenado hace que t no sea necesariamente un año seco, en cuanto al riego.

A su vez, esto tiene efecto en la distribución proporcional de los volúmenes a extraer y los periodos (meses) en que se aplicarán tienen variaciones dependiendo de la condición de humedad del año $t-1$: si el agua es abundante, los periodos de riego serán más amplios, porque habrá cultivos en todos los ciclos, y además se sustituirán aguas subterráneas por superficiales; si el agua es escasa, los periodos con riego se reducen a menos meses y además se desfasan, ya que habrá periodos, principalmente el O-I que tendrán restricciones fuertes, incluso hasta totales; en estos casos, sólo los cultivos de P-V tendrán riego, tal vez también con algunas restricciones, y se procura que su mayor desarrollo se dé en los meses en que llueve, para disminuir extracciones de las presas y ahorrar agua. Las Figuras 7.1 y 7.2 muestran como se comporta esta distribución en la extracción mensual de cada presa, de acuerdo con la característica de humedad del periodo.

Las diferencias que se aprecian en estos gráficos se deben a que las extracciones de la presa Madero, comparativamente pequeñas en relación con las de La Boquilla, sólo complementan el suministro de las demandas de todo el DR, que básicamente se suplen con lo almacenado en La Boquilla.

Por ello se considera que este aspecto de distinguir los periodos según su humedad, y que en la realidad es decisivo, se convierte en una restricción o condición más a cumplir en la modelación para obtener la política óptima. Esto es, resulta poco convincente que en el cálculo de la política se consideren todos los periodos con la misma distribución porcentual o proporcional de extracción.

Bajo estos supuestos, las gráficas de las políticas calculadas para diversos valores del coeficiente se muestran en las Figuras 7.3 y 7.4. Como se ha dicho, para cada una de las políticas en estas gráficas, el primer segmento, cuando $0 < Q_{t-1} < V_1$, que se corresponde con los años secos, tiene una pendiente μ_1 ; el segundo segmento, para los años medios, cuando $V_1 < Q_{t-1} < V_2$, tiene pendiente μ_2 ; el último segmento, correspondiente a los años húmedos, cuando $V_2 < Q_{t-1} < V_{MAX}$, tiene la pendiente μ_3 .

La parte de la política en función del almacenamiento inicial, del que se asigna una fracción μ , simplemente está representada por líneas rectas, a partir del nivel de aguas mínimo, NAMIN, cuya pendiente es precisamente, tal como se muestra en las Figuras 7.3 y 7.4.

La extracción y uso del agua de las presas para la agricultura está determinada por diversos factores, como son las políticas locales, regionales y nacionales de producción, los mercados para los productos, la disponibilidad de crédito y de los demás insumos. De manera que una política óptima considerando exclusivamente la eficiencia en la administración del agua presupone que los demás factores son conocidos, constantes o controlados. Como esto no siempre es verdadero, la política óptima sirve como referencia para que la decisión final que haga el CH del DR sea lo más cercana posible, y de esa manera entonces obtener valores cercanos al óptimo de los volúmenes asignados.

Bajo estas premisas, es posible formar una gama de escenarios, de acuerdo a los valores de μ , que estarán de acuerdo con las condiciones específicas de cada periodo. Cabe aclarar que si en la modelación se utiliza una misma distribución mensual de los volúmenes, es decir, si no se distingue entre años secos, medios y húmedos, las extracciones óptimas calculadas son ligeramente menores; por ello es importante que en el modelo que haga la distinción mencionada entre años.

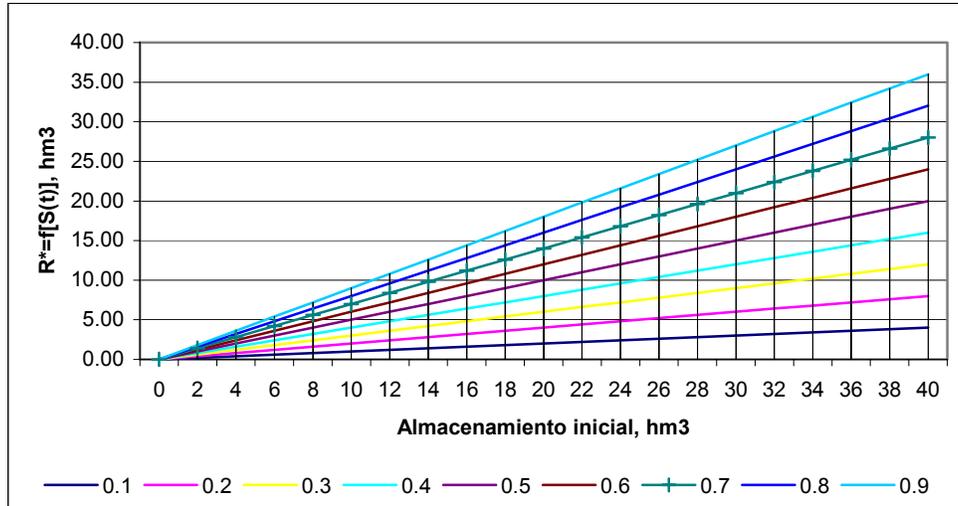


Figura 7.3. Asignación de volúmenes anuales en proporción al almacenamiento inicial, Presa Ing. J. Adame.

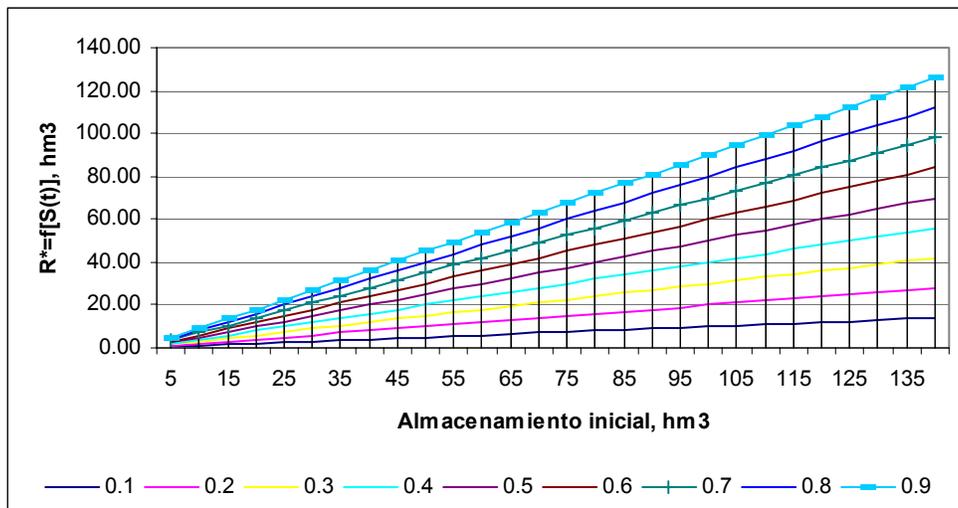


Figura 7.4. Asignación de volúmenes anuales en proporción al almacenamiento inicial, Presa El Chique

La decisión de cuál o cuáles son los valores más apropiados de μ debe partir de un análisis de sensibilidad, y hacer comparaciones entre políticas con valores diferentes de μ y lo que se haya hecho en la realidad; más aún, μ no necesariamente tiene que ser un número fijo, sino que podrá variar de un año a otro, también en función de que el año sea seco, medio o húmedo, y de las expectativas para el siguiente.

La función de seguimiento y evaluación, en primer término, debe abocarse a llevar un registro preciso de los escurrimientos y almacenamientos en las

presas, así como en las extracciones, es decir, el control hidrométrico de las presas con detalle es un aspecto importante, pues permite conocer el estado del agua en tiempo real, y ello incide en tomar las decisiones más acertadas y oportunas.

Igualmente, el seguimiento está referido a que a partir de una política aceptada que pretende ser la más adecuada, asegurarse de que no haya desviaciones o anomalías que pongan en riesgo los periodos subsecuentes; esto es, vigilar que las extracciones sean las programadas, y que los usuarios se ajusten a los volúmenes disponibles en el tiempo en que les toca. Cualquier desviación del programa puede tener serias repercusiones inmediatas, como no poder cumplir con los compromisos de suministro porque se extrajeran mayores volúmenes.

Bajo estos principios, se recalca la convicción de que es preferible tener varias sequías moderadas continuas que una severa o crítica de grandes proporciones. A ello contribuyen las políticas de operación, y los valores óptimos que se obtienen significan la mejor alternativa, desde el punto de vista agua, de tal suerte que las presas efectivamente cumplan con su función reguladora y que el sistema de demanda tenga continuidad operativa en el tiempo, disminuyendo los grandes altibajos entre años. Esta es una manera de mejorar la administración del recurso, desde el punto de vista de manejar el riesgo, y con ello mitigar los impactos.

7.3. EL USO DEL SPI COMO HERRAMIENTA PARA CARACTERIZAR LA SEQUÍA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO JUCHIPILA, ZACATECAS

La sequía siempre ha existido: se tiene conocimiento que en los tiempos de los Aztecas, fue tanto el calor manifestado que se dice “llovió fuego”. En los tiempos de la pre y post-revolución, se han registrado varias sequías donde se comenta que en el Estado de Durango y San Luis Potosí se perdieron miles de cabezas de ganado y en los estados de Zacatecas, Aguascalientes, Durango, Coahuila, Chihuahua y Jalisco, se perdió toda la cosecha de maíz y de frijol (Sancho y Pérez 1978).

En el México contemporáneo, en el año agrícola 1998-1999, el almacenamiento útil registrado al 1 de octubre en las presas de los distritos de riego, fue de tan solo 19,480 Mm³, equivalente al 44% de la capacidad de conservación. Pero en los estados de Nuevo León, Chihuahua, Durango (Región Lagunera) y Sinaloa las restricciones fueron de 83, 46, 78 y 37% respectivamente (IMTA 1998).

El termino “sequía” ha sido usado por muchos investigadores, técnicos y usuarios como falta de agua, déficit de agua, cantidad menor a la lluvia normal, entre otros. Velasco (2002), puntualizó: sequía es el fenómeno natural, inevitable, impredecible, sin epicentro, sin trayectoria, totalmente aleatorio; déficit es el fenómeno artificial, inducido por las actividades humanas. Existe sequía cuando

llueve menos de lo esperado o del promedio histórico, o cuando la cantidad que cae es insuficiente o extemporánea.

El índice de precipitación estandarizado ó SPI, "Standardized Precipitation Index", en su versión en inglés, es uno de los índices más utilizados en los EUA, para la evaluación y monitoreo de la sequía

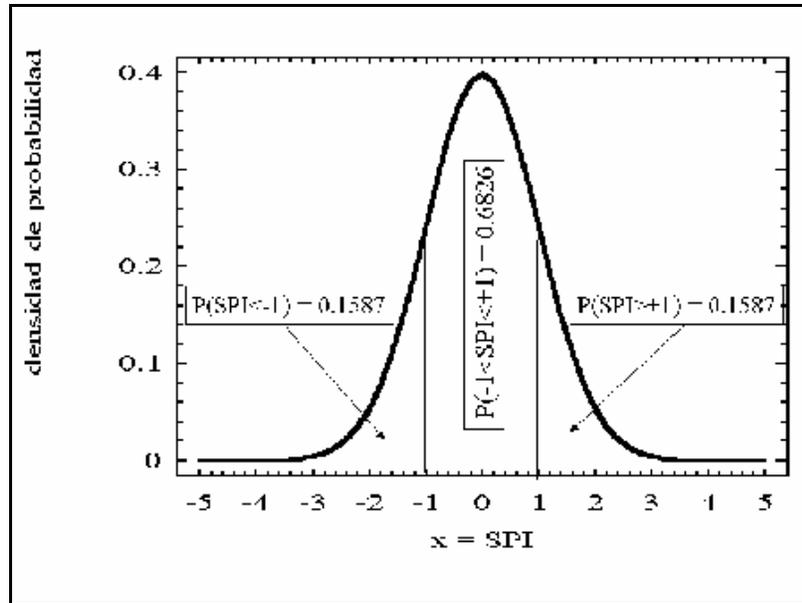


Figura 7.5. SPI (Edwards and McKee, 1997)

meteorológica. Fue desarrollado en 1993 por McKee *et al.* (1993a, 1993b) en la Universidad del Estado de Colorado. Como se describe en el Capítulo 7.2.

Este índice puede obtenerse para diversas escalas de tiempo, las cuales varían desde 1, 3, 6, 12, 24 ó 48 meses, o para cualquier otro periodo de interés en meses. La metodología para el cálculo del SPI se fundamenta en el ajuste de una serie de registros históricos de precipitación total mensual a la función de distribución probabilística de tipo "Gamma incompleta" y, en la transformación de los datos resultantes a la función Normal Estándar. En otras palabras, el SPI representa el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía de la media histórica estandarizada (Figura 7.5). Bajo este contexto, puede deducirse que registros de precipitación superiores al promedio histórico del mes correspondiente, darán valores del SPI positivos, esto representa condiciones de humedad; mientras que en contraparte, registros de precipitación inferiores al promedio histórico del mes correspondiente, arrojarán valores del SPI negativos, lo cuál indica una intensidad en el déficit de humedad (Edwards y McKee, 1997).

En la cuenca alta y media del Río Juchipila (Figura 7.6), las actividades más importantes, como fuentes de empleo y de ingresos para las familias, son la agricultura de temporal y de riego, así como la ganadería. La infraestructura instalada para la captación de agua la componen 444 bordos, para abrevar alrededor de 18,218 cabezas de ganado y 18 presas medianas y pequeñas para el riego de 8,435 hectáreas. Esta infraestructura tiene una capacidad total de almacenamiento de 220 millones de m^3 , mientras que el escurrimiento medio en la cuenca es de solo 96 Mm^3 . Un productor medio dejará de percibir un ingreso bruto de \$36,400.00 por cada hectárea de tomate de hoja, que deje sin regar y de \$20,720.00 por hectárea de guayabo; y el ganado vacuno disminuirá de 25 a 40% las pariciones por la falta de agua y de forraje. Por estas razones, las actividades

son altamente vulnerables a los efectos de las sequías recurrentes, como falta de precipitación y de agua almacenada en los embalses (UAZ, 2002).

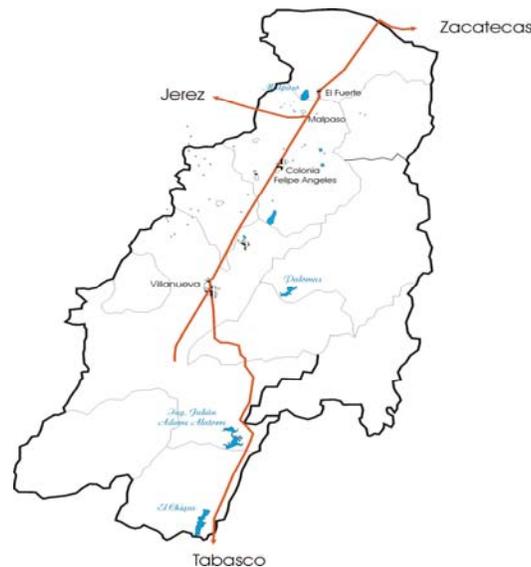


Figura 7.6. Cuenca alta del Río Juchipila.

La respuesta a la falta de volúmenes almacenados en uno o varios años, por la CNA y por los usuarios de las presas El Chique y Tayahua es vista de diferente manera; así, por ejemplo: el mayor interés de ellos es el de disponer del agua suficiente para la seguridad del ingreso y mantener la huertas (guayabo) productivas, sin tomar en cuenta si el año fue seco o húmedo. En el caso de los usuarios de Tayahua (la presa aguas arriba del sistema), en tiempos de sequía, su interés básico es de disponer a cualquier costo de sus volúmenes de agua concesionados, sin importar que los de El Chique no cuente con el agua para el riego de sus cultivos (UAZ, 2002).

La Comisión Nacional del Agua (CNA) como entidad responsable de la planeación y administración del agua, y que da la concesión a los usuarios dispone de métodos y procedimientos para hacer una planeación de la distribución equitativa del recurso agua, para tiempos de escasez. Este enfoque es mas bien de tipo administrativo.

Por otro lado, para lograr esto más apropiadamente, es necesario caracterizar hidrometeorológicamente el año agrícola. Esto debido a que en los actuales reglamentos de la Ley de Aguas Nacionales y de los distritos de riego, el termino “escasez” de agua, no esta caracterizado ni definido cuantitativamente, mediante un método; y además, por ello se presta a ambigüedades en su interpretación. Esto es más patente sobre todo en aquellas presas que por su localización se encuentran en serie, como es el caso de las Presas Tayahua y El Chique.

En la mayoría de los distritos de riego del país, no se hacen estudios para la caracterización de la sequía, para estimar sus características de magnitud, severidad, duración y extensión geográfica. Si consideramos que una disminución en la altura de la lluvia ocasiona bajos escurrimientos, lo que trae como consecuencia bajos volúmenes de agua en los vasos de almacenamientos, el objetivo de este trabajo fue estudiar la evolución de la sequía y su relación con los volúmenes escurridos en la cuenca alta del Río Juchipila, mediante el uso del SPI y proponerlo como método para la caracterización de la sequía en los módulos y unidades de riego de la cuenca.

7.3.1. Metodología

La cuenca alta del Río Juchipila se localiza entre los paralelos 20°51' y 22°46' de Latitud Norte y entre los meridianos 102°25' y 103°30' de Longitud Oeste y comprende parte de la región hidrológica No. 12: Cuenca del Río Santiago, Figura 6.6. Hacia el Norte colinda con la Región Hidrológica No. 37 (Cuenca del Río Salado), hacia el Este con la cuenca del Río Verde y hacia el Oeste con la cuenca del Río Bolaños. El Río Juchipila se origina a 19 km al norte del poblado Malpaso, Zacatecas, tomando este nombre y escurre hacia Villanueva, Zac., para después tomar el nombre de Tabasco y a unos 50 km aguas abajo cambia su nombre por el de Río Juchipila hasta confluir con el Río Santiago.

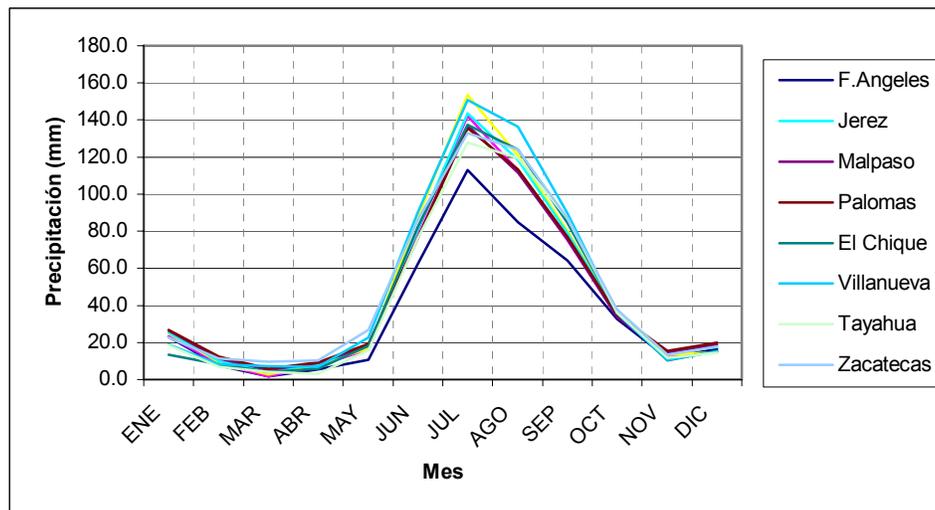


Figura 7.7. Precipitación media mensual en 8 estaciones, pertenecientes a la cuenca del Río Juchipila. (CNA).

El período de lluvias en la cuenca del Río Juchipila se concentra en los meses de Junio a Septiembre (Figura 7.7), período durante el cual precipita el 80% de la lluvia anual. La cuenca alta del Río Juchipila comprende desde su inicio hasta la presa El Chique, con una extensión de 2,750 km² y una elevación media de 1800 msnm. Esta cuenca registra una precipitación media anual de 510 mm.

En la cuenca se localizan dos módulos de riego, que corresponden al Distrito de Riego No. 034, Estado de Zacatecas. El Módulo 4 de la presa Ing. Julián Adame Alatorre (Tayahua) está organizado y constituido en una “Asociación de Usuarios de la Presa Julián Adame Alatorre, A.C.”, la cual está integrada por 858 usuarios de los ejidos de Tayahua, El Chique, Francisco Villa (El Caballete) y San Luis de Custique; los dos primeros del municipio de Villanueva y los dos últimos del municipio de Tabasco; en conjunto, el módulo comprende una superficie de riego de 2,588 ha y un volumen concesionado de 17,800,000 m³.

El Módulo 5 de la presa El Chique, está organizado y constituido en una Figura denominada “Asociación de Usuarios de la Presa El Chique, A.C.”, la cual está integrada por 821 usuarios de los municipios de Tabasco, Huanusco y Jalpa, con un volumen concesionado de 21,440.000 m³ para una superficie registrada de 2,880 ha.

En el Figura 7.7, se presentan las estaciones meteorológicas que se localizan en la cuenca. La información mensual de los datos de la precipitación, para el cálculo del SPI, fue proporcionada por la CNA-Gerencia Zacatecas.

Como se mencionó, se usó el SPI para la caracterización de la sequía en tiempo y en espacio. El planteamiento teórico es que la lluvia se ajusta a la función Gamma y esta se trasforma a una de densidad normal con media cero y varianza de uno (Edwards and McKee, 1996).

Con el propósito de establecer los criterios para la definición de las intensidades de eventos de sequía para una escala de tiempo definida, Hayes (2000) propuso el sistema de clasificación del SPI, Cuadro 7.1.

Cuadro 7.1. Valores característicos convencionales del SPI en relación con la eficiencia de la lluvia (Hayes, 2000).

Valor del SPI	Condición
+2.50 o más	Excesivamente húmedo
+2.00 a 2.49	Muy húmedo
+1.50 a 1.99	Moderadamente húmedo
+1.00 a 1.49	Humedad incipiente
-0.99 a +0.99	Humedad media o normal
-1.00 a -1.49	Sequía incipiente
-1.50 a -1.99	Sequía moderada
-2.00 a -2.49	Sequía severa
-2.50 o menos	Sequía crítica

En términos generales, puede mencionarse que un evento de sequía se inicia cuando se observa a través del tiempo, una tendencia marcada de valores negativos continuos del SPI. De esta manera, el evento de sequía termina cuando el valor del SPI cambia a valores positivos. La duración de un evento de sequía

equivale entonces al número de meses consecutivos en los que el índice es negativo.

7.3.2. Resultados

Primero, se graficaron los valores mensuales de la precipitación de la cuenca (Figura 7.8); esto solo para observar alguna posible tendencia. De los datos y su gráfico se desprende que existe una gran dispersión de los valores mensuales. El valor anual máximo registrado, en el horizonte de planeación, fue de 701 mm en 1971. y el valor mensual máximo registrado fue en julio de 1991 con 350 mm.

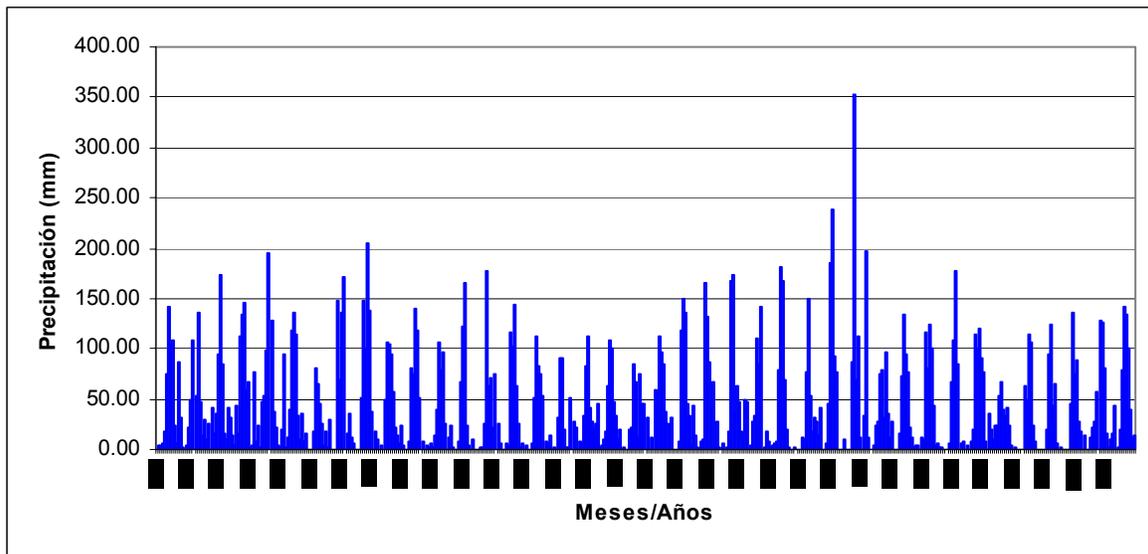
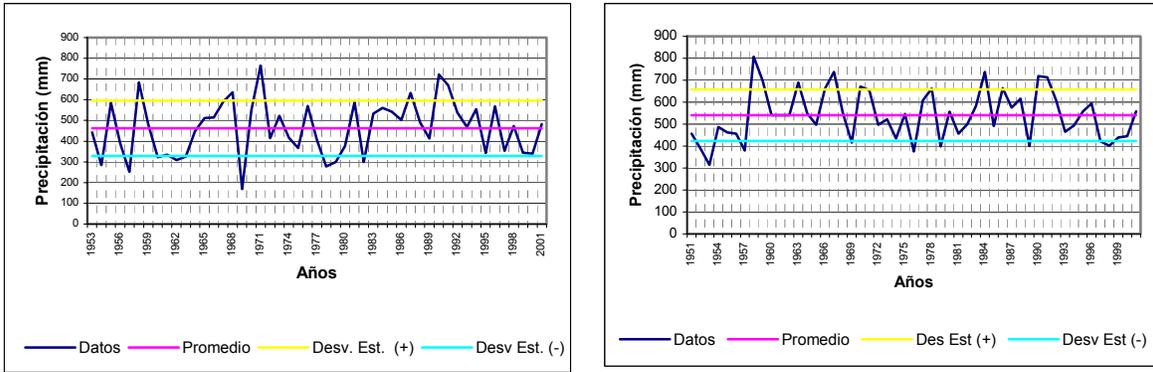


Figura 7.8. Precipitación mensual histórica de la cuenca.

A manera de ejemplo solo se presentan las graficas de dos estaciones (Figura 7.9). Al analizar los últimos 12 años, de=1989 a 2002, resultó que para todas las estaciones en sólo 4 de ellos la lluvia registró valores superiores a la media y en los 8 restantes, la lluvia resultó ser menor, Figuras 7.8 y 7.9. Esto indica que en la cuenca alta del río Juchipila se presentan déficit recurrente de lluvia, por lo que ésta variable es de mucho peso para el desarrollo de las actividades agropecuarias.

De acuerdo con la metodología para el cálculo de los SPI, el índice se obtuvo para periodos de 12 meses: un SPI de 12 - meses al final de Diciembre compara la precipitación total de Enero-Diciembre en un año en particular con las precipitaciones totales de Enero-Diciembre de todos los años de registro. Esto es con el fin de poder realizar comparaciones de un año específico con respecto a su media histórica; también, el valor del índice para el mes de mayo de un año determinado, significa la desviación del periodo junio del año anterior-mayo del año actual, respecto a los periodos similares de todo el registro.



Estación Zacatecas.

Estación El Chique.

Figura 7.9. Precipitación anual histórica.

En las Figuras 7.10a, 7.10b, 7.10c y 7.10d se muestran el comportamiento de las isoyetas y de los SPI, para dos años extremos. En primer lugar se presenta el año de 1999 como el de máxima sequía; de hecho a nivel nacional es un año de sequía. En el caso del año de 1990, resultó ser el más húmedo del período de análisis (1979 - 2002).

En 1999, la precipitación (350.66 mm) fue menor a la media histórica en un 31%. La mayor precipitación se concentró en el Sur de la cuenca, con valores máximos del orden de los 400 mm. En el Este y Noreste los valores máximos fueron 350 y 200 mm. En relación con la isoyetas anuales históricas, en toda la cuenca se presenta menor precipitación; la zona Norte presenta un déficit de lluvia del 56%, la zona Centro presenta un déficit del 35% y la zona Sur presenta un déficit de lluvia del 24% (Figura 7.10a). El escurrimiento para este año fue de apenas 34.11 Mm³, una tercera parte del escurrimiento promedio histórico, lo cual no satisface la demanda para los usos en la cuenca. En la Figura 7.10b se presenta el SPI calculado para 1999, en la que se puede observar que alrededor de dos terceras partes de la cuenca (Norte, Oeste y Sur) presentaron condiciones de sequía moderada, con valores del SPI entre -1 y -1.5. Al Este de la cuenca se presentaron las condiciones más críticas de déficit de lluvia: se alcanzaron niveles de severa a extremadamente severa, con valores del SPI entre -1.5 y -2.5.

En las Figura 7.10c y 7.10d muestran las isoyetas y los SPI respectivamente, para el año de 1990. Primero puede comentarse que la precipitación fue muy superior de la media histórica en toda la cuenca. Por otro lado, los escurrimientos hacia los dos embalses, El Chique y Tayahua, en este año fueron 245.13 millones de m³, muy por arriba del promedio anual que es de 96. Se puede decir que 1990 fue un año agrícola excelente en precipitación para toda la cuenca. Por otro lado, el SPI calculado para el año de 1990 se presenta en la Figura 7.10d. Aunque, el plano de isoyetas se muestra muy parejo, el SPI puede diferenciar por lo menos 4 zonas con diferentes valores, que van desde +1 al +2.5; por ende, el año 1990 tuvo características de humedad incipiente hasta muy

húmedo. En otras palabras en la cuenca baja y media prevaleció el año con humedad incipiente y el resto de la cuenca muy húmeda.

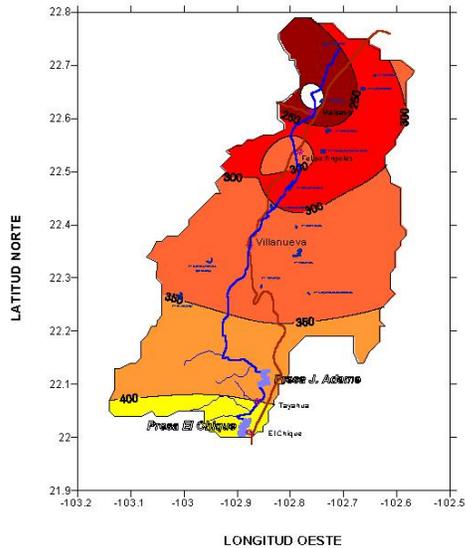


Figura 7.10a. Isoyetas para 1999.

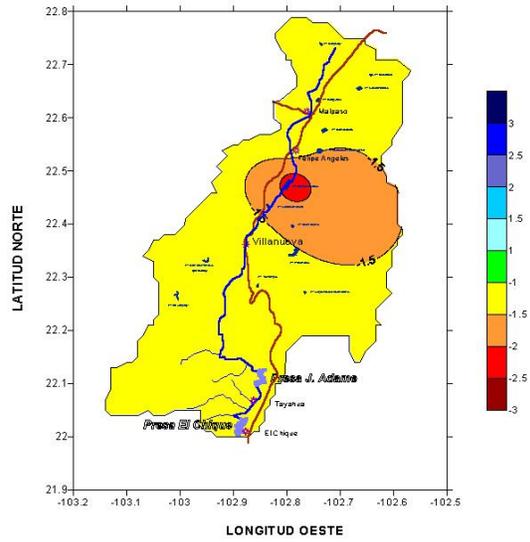


Figura 7.10b. SPI para 1999.

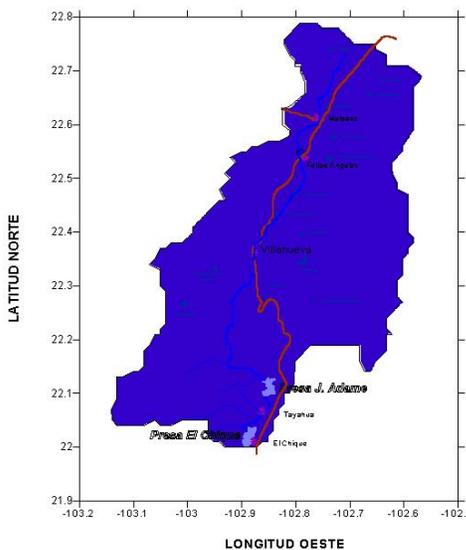


Figura 7.10c. Isoyetas para 1990.

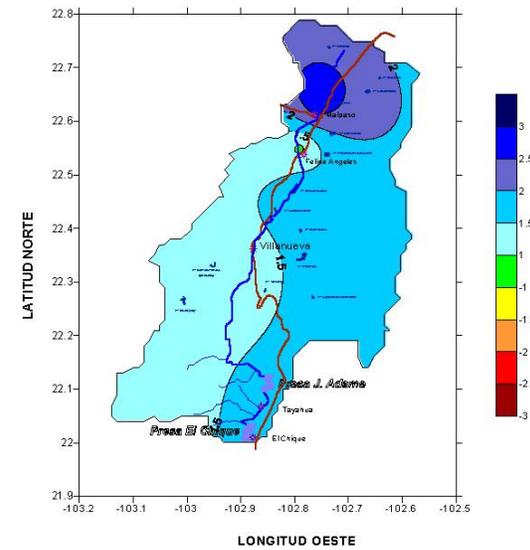


Figura 7.10d. SPI para 1990.

En el periodo de 1993 a 2002, se registraron 4 años con sequía incipiente a severa, 4 años con humedad normal y 2 con humedad normal a moderadamente húmedo. En los años de 1997 a 2000 los faltantes de precipitación fueron de 21 a 56%, con respecto a la media, y los SPI fueron iguales o menores a -1 , lo que indica sequía incipiente a severa, y los escurrimientos variaron de 34.1 a 56.5 Mm^3 muy por debajo de la media de 96 . El resultado: insuficiencia de agua en las presas de El Chique y Tayahua, lo cual se convirtió en un problema social entre los dos grupos de usuarios. Este tipo de análisis se realizó para los años 1979 a 2002, donde se pudo evidenciar la consistencia del SPI para medir los grados de las sequías registrados en la cuenca.

7.3.3. Conclusiones

El SPI es un índice versátil y consistente para detectar y evaluar la sequía meteorológica, ya que solo interviene la lluvia mensual para su cálculo.

Si se considera que una disminución en la altura de la lluvia ocasiona bajos escurrimientos superficiales, ello trae como consecuencia bajos volúmenes de agua en los vasos de almacenamientos; por lo que basándose en estos resultados, se recomienda el uso del SPI para evaluar y dar seguimiento a la sequía en las zonas de riego y en las áreas de aportación de las presas.

Dadas las características del SPI, se recomienda que se incluya como metodología en los Reglamentos de los DR para evaluar la sequía, lo que permitiría apoyar la toma de decisiones y acciones apropiadas para aminorar sus efectos.

7.4 LITERATURA CITADA

Collado, Jaime. 1998. Uso eficiente del agua en cuencas. Ingeniería Hidráulica en México, XIII (1):27-49, enero-abril.

Edwards, Daniel C., and Thomas B. McKee. 1997. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. Climatology Report No. 97-2. Colorado State University. Department of Atmospheric Science, Paper No. 634. 155 pp.

Hayes, Michael. 2000. Drought Indices. En <http://www.drought.unl.edu/dm/archive/99/classify.htm>

IMTA. 1998. Taller Binacional México-Estados Unidos de Mitigación de la Sequía. Jiutepec, Mor.

McKee, T., N. Doesken, and J. Kleist. 1993a. Drought Monitoring with Multiple Time Scales. American Meteorological Society, 9th Conference on Applied Climatology. pp. 233-236.

McKee, T., N. Doesken, and J. Kleist. 1993b. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. American Meteorological Society, 9th Conference on Applied Climatology. pp. 179-184.

Sancho, C. J y Pérez, G. 1978. Análisis de las Sequías en México. SARH. Boletín No. 20.

UAZ. 2002. Informe Técnico: Adecuación del Reglamentación del Distrito de Riego No. 034, Estado de Zacatecas.

Velasco, Israel. 2002. Plan de preparación para afrontar sequías en un distrito de riego. Tesis doctoral. UNAM-División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Campus Morelos. 193 p.

Wagner, Ana Isabel, Jaime Rivera, y Ángel Villalobos. 1996. Políticas de operación óptimas de una presa en función del escurrimiento. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Guayaquil, Ecuador. Vol. 3, pp. 37-48.

8. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA RELACIÓN ENTRE EL USO EFICIENTE DEL AGUA Y EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Dr. Francisco Mojarro Dávila
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias
fmojarro@inifapzac.sagarpa.gob.mx

MC. Ángel G. Bravo Lozano
Investigador del programa de Uso y Manejo del Agua
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Dr. Julián González Trinidad
Profesor-Investigador
Maestría en Planeación de Recursos Hidráulicos
Universidad Autónoma de Zacatecas

Dr. Enrique Playan
Department of Genetics and Plant Production, Estación Experimental de Aula Dei
(EEAD), CSIC, Apdo. 202, 50080 Zaragoza, España

8. ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA RELACIÓN ENTRE EL USO EFICIENTE DEL AGUA Y EL RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Francisco Mojarro Dávila
Ángel G. Bravo Lozano
Julián González Trinidad
Erique Playan

8.1. INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de Meteorología, ha realizado varios estudios del comportamiento de la temperatura y de las concentraciones de varios gases, como producto de las actividades antropogénicas y naturales. Así también, ha realizado proyecciones para los próximos 100 años, de cuales serian los posibles escenarios del comportamiento de la temperatura y de los gases; en todas las simulaciones realizadas, por varios investigadores en diferentes países, los resultados son muy parecidos un incremento de la temperatura y de los gases (Fig. 8.1). A continuación se presenta un breve resumen de esos estudios y proyecciones realizados por el Intergovernmental Panel Climate Change. WMO-UNEP (2001).

El sistema climático del planeta ha cambiado de manera importante a escala nacional y mundial desde la época preindustrial, y algunos de estos cambios se pueden atribuir a actividades humanas. Las actividades humanas han hecho aumentar las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y aerosoles. Las concentraciones atmosféricas de los principales gases antropogénicos de efecto invernadero — como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), y el ozono (O_3) troposférico— alcanzaron los niveles más altos jamás registrados durante el decenio de 1990, debido principalmente al consumo de combustibles fósiles, la agricultura, y cambios en el uso de las tierras. El forzamiento radiactivo proveniente de los gases antropogénicos de efecto invernadero es positivo, aunque queda una pequeña gama de incertidumbre; el de los efectos directos de los aerosoles es negativo y más reducido y el forzamiento negativo procedente de los efectos indirectos de los aerosoles en las nubes puede ser elevado, aunque aún no se ha cuantificado bien.

Se dispone de pruebas de observaciones indicando que el cambio regional del clima, particularmente los aumentos de la temperatura, ha influido ya en un conjunto diverso de sistemas físicos y biológicos de muchas partes del mundo. Entre los cambios observados pueden citarse como ejemplos la contracción de los glaciares, el deshielo de permafrost, el engelamiento ulterior y el deshielo anticipados de las superficies de ríos y lagos, el alargamiento de las estaciones de crecimiento en latitudes medias a altas, los desplazamientos de las zonas de plantas y animales hacia el polo y a mayores altitudes, las disminuciones de algunas poblaciones de plantas y animales, y el florecimiento temprano de

árboles, la emergencia de insectos y de puesta de huevos de los pájaros (Figura 8.1). Hay muchos documentos de prueba de que existe una asociación entre los cambios de temperaturas regionales y los cambios observados de sistemas físicos y biológicos en muchos entornos acuáticos, terrestres y marinos.

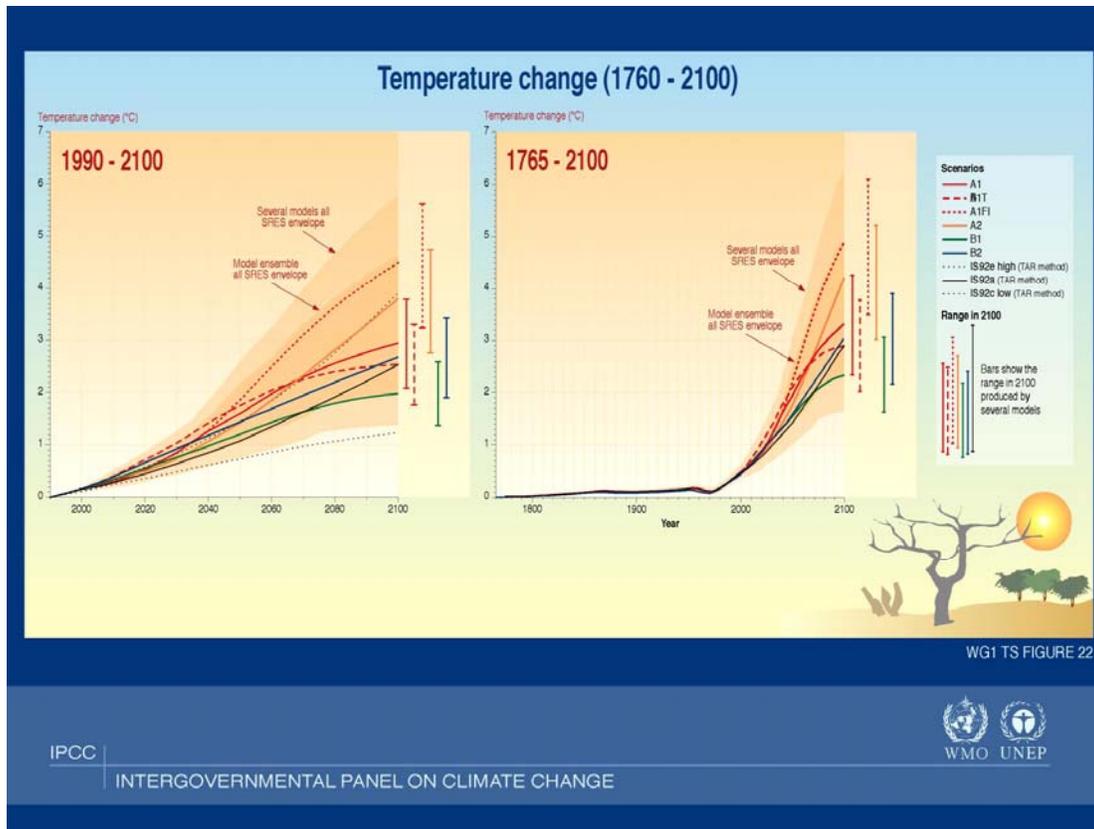


Figura 8.1. Proyecciones de los cambios en temperatura y en las concentraciones de CO₂. Intergovernmental Panel Climate Change. WMO-UNEP (2001)

La respuesta del rendimiento de los cultivos al cambio climático varía mucho en función de las especies, los cultivares, las condiciones del suelo, el tratamiento de los efectos directos del CO₂, y otros factores propios del lugar. Se ha establecido con un nivel de confianza mediana que unos pocos grados (2°C a 3°C) de calentamiento proyectado producirán aumentos en el rendimiento de los cultivos de zonas templadas, con algunas variaciones regionales. Con cifras mayores de calentamiento proyectado, las respuestas de la mayoría de los cultivos de climas templados en general pasan a ser negativas.

La adaptación agronómica autónoma reduce las pérdidas de rendimiento en los cultivos de climas templados y en la mayoría de los casos lo aumenta (Figura 1). En los trópicos, donde algunos cultivos están cerca de su tolerancia máxima a la temperatura y donde predomina la agricultura de secano, los rendimientos en general podrían reducirse, aun con cambios mínimos en la

temperatura; si se produjera una gran disminución de las precipitaciones, los efectos sobre el rendimiento de los cultivos serán mas adversos.

La creciente concentración de CO₂ incrementara la productividad primaria neta en la mayoría de los sistemas, mientras que los aumentos de la temperatura podrán tener efectos positivos o negativos. Los experimentos con tres especies criadas con niveles elevados de CO₂ durante varios años muestran una estimulación continua y coherente de la fotosíntesis y pocos indicios de perdida a largo plazo de la sensibilidad al CO₂. Los resultados de investigaciones indican que los primeros y mas grandes impactos inducidos por el cambio climático probablemente se producirán en los bosques boreales, mediante cambios en los regimenes de perturbaciones relacionadas con el clima.

En las tierras áridas o semiáridas (los pastizales, bosques y tierras forestales) donde el cambio climático probablemente disminuirá la humedad disponible en el suelo, se prevé que la productividad aumentara. Las concentraciones altas de CO₂ pueden contrarrestar algunas de estas perdidas. No obstante, muchas de estas zonas sufren los efectos de El Niño y La Niña, otros extremos climáticos y perturbaciones como los incendios. Los cambios en las frecuencias de estos sucesos y las perturbaciones podrían dar lugar a perdidas de productividad y, por ende, a una posible degradación de la tierra, perdida del carbono almacenado o disminución de la tasa de absorción de carbono.

8.2. EL USO EFICIENTE DEL AGUA Y LA PRODUCCION DE LOS CULTIVOS, BAJO INCREMENTOS DE TEMPERATURA Y DE CONCENTRACIONES DE CO₂

La India, país anfitrión de la nueva conferencia sobre el clima, de la ONU desarrollada en octubre del 2002. La India, sufrió este año una terrible sequía y también graves inundaciones, fenómenos que los expertos atribuyen al calentamiento del planeta. "Asistimos durante la última estación de los monzones en la India (de julio a septiembre) a variaciones a menudo repentinas del clima en el marco del calentamiento climático global, que ha afectado ya profundamente en régimen de lluvias de la región", explicó el meteorólogo R.K Pachauri (NUEVA DELHI, India, oct. 28, 2002).

El país sufrió este año una sequía que las autoridades indias consideran la peor de su historia. El mes de julio fue el más seco, con un déficit nacional de precipitaciones de 49%, cifra que alcanzó 70% en el oeste del estado de Rajastán (noroeste) y más del 50% en los estados de Punjab y Haryana, principales productores de cereales del país. "El desastre ha empezado ya en la India", afirma Amit Srivastava, miembro de la ONG Corpwatch, que insta a los países ricos que contaminan la atmósfera a "despertarse".

Si partimos del hecho, que las perdidas económicas por una falta de humedad en el suelo en la agricultura causan un impacto mayor que todos los otros factores juntos. También, se ha comentado que si la agricultura es la base

de la alimentación de la población mundial, los rendimientos de los cultivos deberán de ser mejorados substancialmente bajo condiciones limitantes de agua.

Por lo tanto, las actividades de investigación y de transferencia de tecnología se deben de concentrar en el hecho de buscar estrategias óptimas para disminuir la evaporación del suelo y disponer de humedad aprovechable en el suelo para que la velocidad de transpiración, del cultivo no se vea afectada y se incremente la eficiencia de uso de agua.

Antes de considerar como el cambio climático pudiera afectar la distribución de las especies animal y vegetal; así como algunos componentes del rendimiento, es esencial considerar los efectos potenciales por un incremento en la concentración del CO₂ y de la temperatura en la atmósfera, que pudieran ser los responsables de dichos efectos. La concentración de CO₂ atmosférico se ha incrementado en un 37% durante los pasados dos siglos, hasta llegar a una concentración de 370 mmol mol⁻¹. En las proyecciones realizadas por los grupos de investigadores en el comportamiento de la calidad de la atmósfera, se tiene proyectado un incremento global del doble principalmente de CO₂ y otros gases (CH₄, N₂O, NO_x, CO) durante el presente siglo XXI, dando como consecuencia un incremento del sobre - calentamiento de la tierra. Se prevé que solo el incremento en la concentración de CO₂ pudiera aumentar la temperatura de la tierra de 2 a 4.5°C para mediados del presente siglo XXI y esto traerá aparejado aun cambio en el patrón de la precipitación (Keeling and Whorf, 2000, Alcamo et al., 1996, Wayne, 2002 y ONU, 1990 y 1995). Mas sobre lo mismo, el PICC (ONU, 1990 y 1995) reconoció que la temperatura promedio global se elevo de 0.3 a 0.6°C, en comparación con los niveles pre-indutriales (antes de 1750).

Sin embargo, las proyecciones de los efectos para el futuro de los cambios en el clima son inciertas. Por ejemplo, los modelos de simulación que se han usado para predecir el rendimiento de los cultivos con solo considerar incrementos del CO₂, son diferentes de los obtenidos en la realidad (Wayne 2002).

Definitivamente los cambios en la concentración de CO₂ y de un incremento de la temperatura, son situaciones impostergables, y que sus efectos son directamente un déficit de la humedad en el suelo y la estimulación del crecimiento y desarrollo de los cultivos, como se vera mas adelante. Esta situación promueve un reto para toda la sociedad y en especial a los responsables de la producción de alimentos, pero también es una oportunidad para buscar y adelantar estrategias para continuar incrementando la producción de los cultivos con menos disponibilidad de agua.

Los componentes del rendimiento (materia seca, área foliar, llenado, numero y peso de grano o fruta y producción) y la evapotranspiración de los cultivos esta determinado por el medio ambiente, la disponibilidad de agua en el suelo y por el uso eficiente que el cultivo hace del agua. Los resultados de trabajos de investigación que se discutirán a continuación tienen como factor común el

rendimiento de los cultivos y el uso eficiente del agua disponible, tomando en cuenta que la temperatura y la concentración de CO₂ se incrementarían.

Si partimos del hecho que el “uso eficiente del agua” (UEA) a nivel de campo es la relación entre la producción de materia seca y la evapotranspiración la cual tiene dos componentes, por un lado esta la transpiración de los cultivos y la evaporación directa del suelo. Sin embargo, a nivel de planta esta relación es entre la producción neta de fotosíntatos o de asimilatos (A) y la transpiración (T). De esta forma el UEA tiene la siguiente relación:

$$UEA = A/T = 1/ > w \times A / g = 1/ > w \times (C_a - C_i) g_c / 1.6 g_c = 1/ > w \times C_A (1 - C_i / C_a) / 1.6$$

Donde C_a y C_i son la concentración de CO₂ del aire y de los espacios intercelulares respectivamente; 1.6 es el cociente de la difusión de vapor de agua y el CO₂ del aire; > w es la fracción molar del vapor de agua entre las hojas y el aire; g y g_c la conductividad estomatal entre el vapor de agua y el CO₂ respectivamente.

Podemos hacer algunos comentarios de tipo general, aunque no siempre es así, de posibles causas y efectos por ejemplo: esta claro que hay una relación de tipo directo entre UEA y la producción de asimilatos y la relación es positiva; por otro lado, la relación entre UAE, g y > w es de signo negativo. Lo que indica que a un incremento en la concentración de CO₂ da como resultado un incremento en UEA por que se estimulo la producción de A o a una combinación entre A, g y > w. Y que pasa con la relación UEA y T, cuando se presenta un periodo de sequía en el suelo o en la atmósfera (baja humedad relativa) lo más probable es que la producción de fotosíntatos se vea reducida básicamente por el cierre estomatal; sin embargo, cuando se presenta un incremento en la concentración de CO₂ no pudiera ser del todo verdad. Por lo que se infiere que la producción de fotosíntatos y la transpiración son mecanismos diferentes.

La mayoría de las plantas herbáceas responden, con el cierre de los estomas, a incrementos en la concentración de CO₂ dando como resultado un incremento en UEA. Los estomas son altamente sensibles a CO₂ debido a su relación directa con g tanto en especies C₃ como en C₄. Lo anterior deberá ser así debido a que las variaciones en g se relacionan de una forma directa con A, siempre y cuando la relación C_i/C_a permanezca casi constante, ante una variación en la concentración de CO₂. Esto nos lleva a entender que a un incremento en C_a habrá un incremento lineal en UEA. Por ultimo si w permanece sin cambios y que solo existan incrementos en C_a, esto se traducirá en incrementos en UEA (ecuación 1). UEA de estas especies se ha elevado un 37% debido a los incrementos que se han registrado de CO₂ desde los tiempos de la industrialización (Polley et al., 1993, Morison, 1993).

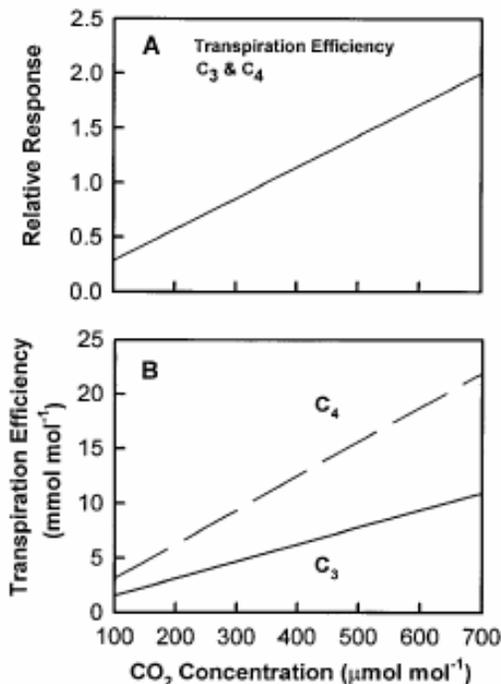


Figura 8.2. Respuesta de la eficiencia en transpiración a concentraciones de CO₂ en plantas C₃ y C₄. Tomado de Wayne (2002).

Sin embargo existen en la literatura varios reportes donde se asienta que a incrementos de CO₂, las especies C₄ son más eficientes relativamente en UEA que las C₃ especies. Retomando la ecuación 1, la diferencia absoluta en UEA entre estas especies radica en el hecho que la relación C_i/C_a y w no cambien (Figura 8.2).

Por otro lado, incrementos en la temperatura del medio ambiente, generalmente se asocian con valores altos en w o a una gran diferencia en vapor de agua entre la hoja y el medio ambiente. Usualmente cuando esto sucede, ocurre el cierre parcial de los estomas dando como consecuencia una disminución en los valores de C_i (ecuación 1). Estas características del medio ambiente promueven un incremento en la transpiración (T). Lo anterior puede ser explicado de la forma siguiente: a) un incremento en la

temperatura del aire hace que el poder secante de la atmósfera sea mas grande, es decir existe una mayor demanda de moléculas de vapor de agua de la planta al aire y esto promueve valores altos de g; b) a medida que se incrementa la temperatura de la planta, se acelera la perdida de vapor de agua de los espacios intercelulares causando un incremento en g y por ende en la transpiración (T) (Morison, 1993; Wayne, 2002; Montieth 1985; Berkhout y Van Keulen, 1986; Van Keulen H and Wolf J. 1986 y Ritchie, 1983).

8.3. USO EFICIENTE DEL AGUA DE LOS CULTIVOS Y CAMBIOS CLIMÁTICOS

Se han realizado muchos experimentos para estudiar la respuesta del UEA de varios cultivos y las variaciones en la concentración del CO₂. Generalmente estos han sido desarrollado en ambientes controlados y muy pocos en condiciones de campo.

Valores elevados de CO₂ promueven la producción de biomasa desde un 41 a un 44% de más biomasa, en plantas C₃ y en plantas C₄ es de tan solo de un 22 a un 33%. Sin embargo, en condiciones de estrés como puede ser un incremento en la temperatura del aire, deficiencias de humedad en el suelo y de fertilizantes, generalmente la producción de biomasa se ve mas afectada en las plantas C₃. Derner et al., (2003) trabajando con especies C₃ (algodón *Gossypium hirsutum*) y C₄ (sorgo, *Sorghum bicolor*) y variando la concentración de CO₂ de 373 a 566 mmol mol⁻¹ y el agua disponible en el suelo, encontraron que las altas

concentraciones de CO₂ promovieron incrementos del 37% en la altura de la planta, de 86% en el área foliar, de un 85% en la producción de biomasa y de un 544% en la mayor producción de bellotas, en el cultivo del algodón (Cuadro 8.1).

Cuadro 8.1. Algunos componentes del rendimiento en plantas de sorgo y algodón sometidas a dos concentraciones de CO₂ (FACE por sus siglas en Inglés Free-air carbon enrichment) y a humedad en el suelo (tomado de Derner et al., 2003).

Variable	CO ₂ (mmol mol ⁻¹)		Incremento (%)	humedad en el suelo		Incremento (%)
	Contr ol (373)	FACE (566)		Seco	Húmedo	
Algodonero						
Mes Agosto						
Área foliar (m ² m ⁻²)	4.52	8.39	+86	4.81	8.11	+69
Biomasa (g)	432	797	+85	508	721	+42
Mes Octubre						
Altura (cm)	31.6	43.4	+37	27.4	47.8	+76
Bellotas	16	103	+544	42	74	+75
Sorgo						
Mes Agosto						
Área foliar (m ² m ⁻²)	9.58	10.19	+6	9.59	10.17	+6
Biomasa (g)	1463	1432	-2	1342	1555	+16
Mes Octubre						
Altura (cm)	44.9	46.3	+3	38.6	52.5	+36
Granos/espiga	21	26	+24	25	23	-8
Peso semilla (gr)	486	674	+39	483	690	+43

En el caso del sorgo, las respuestas a altas concentraciones de CO₂ fueron completamente diferentes. Solamente podemos decir que el mayor incremento se presenta en el número de granos por espiga de un 24% y del peso de la semilla con un 39%.

En el caso de los tratamientos de la humedad en el suelo para la planta del algodón. Alto contenido de humedad en el suelo promueve un incremento del 69% en el área foliar, en un 76% la altura, de un 75% el numero de bellotas y de un 42% de mas biomasa.

En el caso de la planta de sorgo, los altos contenidos de humedad en el suelo produjeron un 36% mas de altura, un 6% en área foliar, un 16% en biomasa y de un 43% en el peso de la semilla.

Resumiendo, cambios en las concentraciones de CO₂ y altos contenidos de humedad en el suelo, se promueven incrementos en algunos componentes del rendimiento, mas en plantas C₃ que en C₄. Además, la promoción de una mayor UEA por la planta es más pronunciada con altas concentraciones de CO₂ que con déficit de agua en el suelo. Una de las conclusiones importantes de estos trabajos es que los efectos en los cambio en CO₂ de 373 a 566 mmol mol⁻¹ dependen en parte de las condiciones de la humedad en el suelo, para las plantas de sorgo y del algodón (Wand et al., 1999). Y muy importante, los modelos de simulación de los efectos del cambio climático deben de considerar la respuesta individual de las especies.

En trabajos desarrollados en cámaras de clima controlado y a nivel de hoja, se encontró que la transpiración esta correlacionada linealmente con valores de *g* (ecuación 1) y que altas concentraciones de CO₂ tienen poco efecto sobre el UEA (Chaudhuri et al., 1986). Mas sobre lo mismo, cambios en la concentración de CO₂ reducen la UEA a nivel de hoja, debido a que los cambios en la concentración de CO₂ dan valores bajos de la transpiración de la hoja. Y esto es debido a lo siguiente: a) elevadas concentraciones de CO₂ promueven valores altos de área foliar; b) la interacción CO₂ y el contenido de humedad en el suelo no esta del todo bien definida, pero se puede comentar que la eficiencia del efecto del CO₂ en la producción de los cultivos depende del agua en el suelo; c) la perdida de agua por transpiración y evaporación del suelo es un fenómeno que no se puede separar, a nivel de campo (Baker and Allen 1993 y Wayne 2002).

El rendimiento final del cultivo del trigo es una función de la tasa y de la duración del periodo de formación del grano y de la translocación de fotosintatos. Li et al., (2000), trabajando con el cultivo del trigo bajo dos niveles de CO₂, 370 a 550 mmol mol⁻¹ y dos criterios de aplicar el riego cuando el 30% de la humedad se haya consumido y reponer solo el 50% de la lámina de riego. Elevadas concentraciones de CO₂ y los altos contenidos de humedad en el suelo afectaron el proceso de llenado del grano, de la espiga principal. Un aspecto importante, bajo condiciones de limitaciones de agua en el suelo el proceso de llenado del grano se ve compensado con las altas concentraciones de CO₂. El peso del grano, al final del ciclo, se vio aumentado en un 4% bajo el tratamiento de 550 mmol mol⁻¹ con limitaciones de agua. La aplicación del riego con el 30% de la humedad aprovechable promovió el peso del grano al final del ciclo bajo un ambiente de 370 mmol mol⁻¹ de CO₂ de un 7% y con un 5% con el de 550 mmol mol⁻¹, básicamente porque se prologo el periodo de llenado del grano. El incremento en peso del grano en altos valores de CO₂ se atribuyo a un incremento en la tasa de llenado del grano y el efecto del riego fue que el proceso de duración del llenado del grano se prolongo. Más sobre lo mismo, bajo condiciones de falta de agua y elevados niveles de CO₂ se estimulo el llenado del grano en un 16% y el efecto conjunto, de buenas condiciones de agua y elevados niveles de CO₂ también produjo un incremento del 16% en el llenado del grano. La senescencia de la hoja se retrazo de 2 a 3 semanas en los tratamientos de buenas condiciones de agua. Finalmente, los incrementos en el peso del grano presumiblemente fueron

causados por un incremento en la capacidad de producción de fotosintatos y el periodo efectivo de la hoja fotosintéticamente activa se prolongo y que los mecanismos de los efectos del CO₂ y de la humedad en el suelo sobre el llenado del grano son diferentes.

Otro aspecto no menos importante, es el del uso de modelos de simulación para predecir el futuro comportamiento de los cultivos bajo condiciones de un cambio climático, básicamente en la concentración de CO₂ y de la temperatura. Las actividades antropogénicas han incrementado las emisiones de gases a la atmósfera y por ende han resultado en un incremento en la temperatura de la tierra.

Mall et al., (2004) realizaron varios trabajos sobre la simulación de la producción del cultivo de la soya, en la India. Para el caso de la India, se espera que la temperatura media anual, en el presente siglo, se incremente en un 3.5 a 5.5°C. Los resultados sobresalientes se presentan en dos escenarios: 1) aumento de temperatura y manteniendo el nivel actual de CO₂, los rendimientos de soya declinaran pasando de 3950 kg/ha a 3100; y la cantidad de biomasa de 7300 a 6650 kg/ha; y 2) aumento en la concentración de CO₂ al doble y con incremento de la temperatura, los rendimientos pasaran de 5400 a 4250 kg/ha y de biomasa de 10000 a 9100 kg/ha. De estos resultados se desprende que la agricultura se beneficiara de los cambios en las concentraciones de CO₂ básicamente los cultivos realizaran un incremento en UEA, pero en contraste este beneficio es probable que no se de debido a los incrementos en la temperatura, que aceleran la perdida de agua por la transpiración de las plantas y evaporación del suelo. También, los cultivos en condiciones extremas de altas temperaturas y de la falta de agua en el suelo, la tasa de fotosíntesis se reduce y el cultivo por conservación baja el rendimiento final.

Por otro lado, los distintos cambio en la temperatura del aire a finales de los años de 1980, han sido los responsables en el cambio en el patrón de la fonología en los cultivos del Manzano y Cherry. Chmielewski et al., (2003) comenta que la temperatura del aire en Alemania se incrementa en un +0.36°C por década, lo que significó un incremento en los últimos 40 años de 1.4°C. Los cambios en la fonología del cultivo del manzano muestran que la temperatura del aire se incrementa en 1°C de lo normal, de febrero a abril, lo que propicia que del inicio de la estación al inicio de la floración se vea reducida en 5 días a una semana. Estos cambios se han visto más pronunciados a finales de los años 80. Por ultimo, los cambios fonológicos serán más pronunciados en los años venideros y serán de mucha importancia económica su reconocimiento ya que ciertas actividades como la dormancia, el inicio de floración, el proceso de formación de frutos y la cosecha, dependen principalmente de la temperatura del aire.

8.3. RESUMEN

El cambio climático proyectado ha de tener efectos beneficiosos y adversos en los sistemas ambientales y socioeconómicos, pero cuanto mayor sean los cambios y la velocidad de los cambios climáticos, más predominarán los

efectos adversos. Se prevé que los impactos adversos del cambio climático afecten de forma desproporcionada a los países en desarrollo y las personas más pobres dentro de los países.

Las medidas para la reducción de gases de efecto invernadero (mitigación) atenuarían las presiones sobre los sistemas naturales y humanos debidas al cambio climático. Los costos de la mitigación varían entre las diferentes regiones y sectores. Existen importantes oportunidades tecnológicas y de otro tipo para reducir dichos costos.

Por las razones encontradas en los documentos anteriores, altas concentraciones de CO₂ no se propicia un mayor "Uso Eficiente del Agua" de los cultivos. También se puede concluir que los experimentos en campo, indican que el rendimiento económico no se reduce cuando se incrementa el CO₂ y no se dispone de suficiente agua en el suelo. Además y muy importante, un incremento en el CO₂ trae consigo un incremento en la transpiración al incrementar el área foliar de los cultivos. Un incremento en la temperatura del aire reduce la "Uso Eficiente del Agua" (ecuación 1) ya que la pérdida de agua vía transpiración y evaporación se incrementa. Las respuestas de las especies (C₃ y C₄) a altas concentraciones de CO₂ y a cambios en la humedad disponible en el suelo, son diferenciadas.

Finalmente, entre los aspectos importantes ante el escenario de cambios climáticos que se reflejaran en incrementos en la concentración de CO₂ y de la falta de agua en el suelo, se tiene que generar estrategias para: 1) evitar la pérdida de agua de la lluvia o del riego, por evaporación directa del suelo y 2) de genotipos altamente eficientes en el uso del agua, que sean capaces de interceptar menos radiación solar y que el cociente Transpiración/Evaporación sea mayor.

8.4. LITERATURA CITADA

Alcamo, J., G.J.J. Kreileman, J.C. Bollen, G.J. van den Born, R. Gerlagh, M.S. Krol, A.M.C. Toet, and H.J.M. de Vries. 1996. Baseline scenarios of global environmental change. *Global Environmental Change* 6:261–303.

Baker J. T and Allen Jr. 1993. Contrasting Crop Species Responses to CO₂ and Temperature: Rice, Soybean and Citrus. *Vegetation* 104/105:239-260.

Berkhout J. A. A and van Keulen H. 1986. Potential Evapotranspiration. In *Modelling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops*. H. van Keulen and J. Wolf (eds).

Chaudhuri U. N., Burnett, R. B., Kanemasu, E. T y Kirkam, M. B. 1986. Effect of elevated levels of Carbon Dioxide on Sorghum Yield, Root growth, and Water Use. *Agric. For. Meteorol.* 37:109-122.

Chmielewski M. F. et al., 2003. Climate Changes and Trends in Phenology of Fruit Trees and Field Crops in Germany, 1961-2000. *Agricultural and Forestry Meteorology* 121 (2004) 69-78.

Derner, J.D., H.B. Johnson, B.A. Kimball, P.J. Pinter Jr., H.W. Poley, C.R. Tischler, T.W. Bouton, R.L. Lamorte, G.W. Wall, N.R. Adam, S.W. Leavitt, M.J. Ottman, A.D. Matthias y T.J. Brooks. 2003. Above and below ground responses of C₃ - C₄ species mixtures to elevated CO₂ and soil water availability. *Global Change Biology*. 9, 452-460.

Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO-UNEP . 2001. *Climate Change 2001: Synthesis Report*. WMO.

Keeling, C.D., and T.P. Whorf. 2000. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In *Trends: A compendium of data on global change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge Nat. Lab., Oak Ridge, TN.

KIERNAN, V. 1966. Wealthy nations face drinking water crisis. *New Scientist*, Jun. 1, p.10.

Mall K. R., Lal, V.S., Rathore, L. S., and Singh, R., 2004. Mitigating Climate Change Impact on Soybean Productivity in India : a Simulation Study. *Agricultural and Forestry Meteorology* 121 (2004) 113-125.

Monteith L. J. 1985. Evaporation from Land Surface: progress in Analysis and Prediction since 1948. In *Advances in Evapotranspiration*. American Society of Agricultural Engineers (eds).

Morison, J.I.L. 1993. Response of plants to CO₂ under water limited conditions. *Vegetatio* 104/105:193-209.

ONU. 1990 Y 1995. *Cambio Climático. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático de la Organización de las Naciones Unidas (PICC)*.

Polley, H.W., H.B. Johnson, H.S. Mayeux, and S.R. Malone. 1993. Physiology and growth of wheat across a subambient carbon dioxide gradient. *Ann. Bot. (London)* 71:347-356.

Ritchie, J. T. 1983. *Efficient Water Used in Crops Production: Discussion on the Generality of Relation between Biomass Production and Evapotranspiration. In Limitation to Efficient Water Use in Crop Production*. Ed Taylor H. M. Jordan W.R., and Sinclair T. R.

Van Keulen H and Wolf J. 1986. *Modeling of Agricultural Production: Weather, Soils and Crops (Eds)*. Capitulo 3. *Crop Production as Determined by Moisture Availability*.

Wayne P.H. 2002. Implication of Atmospheric and Climatic Change for Crop yield and Water Use Efficiency. Crop Science, Vol., 42:131-140 (2002).

9. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LA SEQUÍA EN EL ESTADO DE ZACATECAS

Agustín Rumayor Rodríguez
Director de Coordinación y Vinculación en Zacatecas
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias
arumayor@inifapzac.sagarpa.gob.mx

MC. Guillermo Medina García
Investigador del programa de Potencial Productivo
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Francisco Echavarría Cháirez
Investigador del programa de Sistemas de Producción
Campo Experimental Zacatecas
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícola y Pecuarias

Maximino Luna Flores
Profesor-Investigador
Unidad Académica de Agronomía
Universidad Autónoma de Zacatecas

Jesús Vallejo Díaz
Subdelegado Agropecuario
Delegación Zacatecas
Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación

9. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN DE LA SEQUÍA EN EL ESTADO DE ZACATECAS

Agustín Rumayor Rodríguez
Guillermo Medina García
Francisco Echavarría Cháirez
Maximino Luna Flores
Jesús Vallejo Díaz

9.1. INTRODUCCIÓN

El fenómeno conocido como “El Niño” en su fase extrema, ha tenido una significativa repercusión negativa a escala mundial en la producción y productividad de las especies de granos básicos de los que depende la población. Este fenómeno ocurre por el calentamiento anormal de las aguas superficiales del Centro-Este del océano Pacífico Tropical, y se presenta generalmente alrededor de la Navidad, a la altura de las costas del Perú. Otro índice que define “El Niño”, es la Oscilación del Sur, el cual mide las diferencias cíclicas en la presión del aire, que ocasiona cambios en la dirección de los vientos.

La presencia de “El Niño” tiende a ser cíclica, con intervalos promedio de cuatro años y con un impacto global de 24 meses. En general, “El Niño” genera condiciones de sequía en el centro y sur de México, presentando lluvias intensas en secciones del norte del país, con inviernos generalmente húmedos. En el caso de Zacatecas, se considera que cuando “El Niño” se presenta con condiciones extremas, entonces se tienen sequías más fuertes de lo común. El fenómeno de La Niña es una anomalía contraria a la del Niño, generando lluvias excesivas en el Centro-Sur del país, con un invierno con marcada ausencia de lluvias. De 1960 al 2000, se han presentado nueve Niños, tres Niños Extremos, siete Niñas y 20 años Neutros o Normales (Cuadro 9.1).

En el estado de Zacatecas, la sequía ocasionada por el mencionado fenómeno puede presentar un impacto muy elevado, debido a que el 88 % de superficie dedicada a la agricultura se realiza en condiciones de temporal, y se manifiesta en diferente magnitud en la superficie sembrada con los cultivos de frijol y maíz, que representan las especies de mayor superficie sembrada en el Estado.

Los índices de siniestralidad de estos cultivos establecidos en temporal, durante un periodo promedio de 10 años, ha variado desde un 10% en los cereales hasta un 23% en el cultivo de maíz (Figura 9.1). Las principales causas de siniestros son sequía, heladas y uso de genotipos no adecuados; sin embargo por la magnitud de la superficie sembrada que representa el frijol en el estado, y que en promedio supera las 700 mil hectáreas, el 17.2 % de siniestralidad se considera muy significativo.

Cuadro 9.1. Relación de años en los que se ha presentado el fenómeno de “El Niño”, “La Niña” y el “Año Neutro”. Se resalta la presencia de los “Niños Extremos”. Fuente: Medina García, G. Elaboración propia.

El Niño	La Niña	Neutro
1963-1964	1964-1965	1961-1962
1965-1966	1970-1971	1962-1963
1969-1970	1973-1974	1966-1967
1972-1973*	1975-1976	1967-1968
1976-1977	1988-1989	1968-1969
1977-1978	1998-1999	1971-1972
1982-1983*	1999-2000	1974-1975
1991-1992		1978-1979
1993-1994		1979-1980
1996-1997		1980-1981
1997-1998*		1981-1982
		1983-1984
		1984-1985
		1985-1986
		1987-1988
		1989-1990
		1990-1991
		1992-1993
		1994-1995
		1995-1996

*Niños extremos

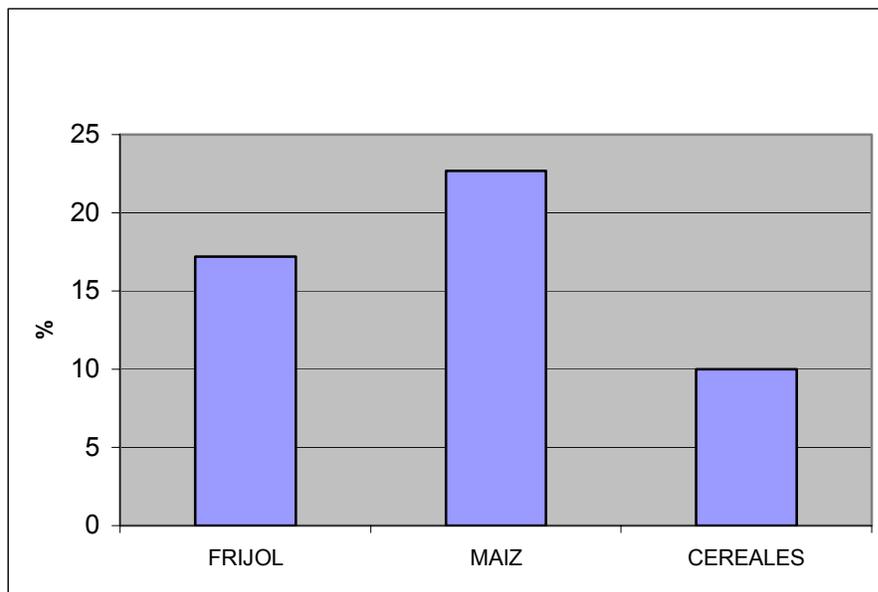


Figura 9.1. Porcentaje de siniestro en cultivos de temporal en el estado de Zacatecas en promedio de 10 años (1991-2000). Fuente: Medina García, G. Elaboración propia.

La presencia de la sequía intraestival, y su modificación por la presencia de niños extremos, se ejemplifica con el caso de la zona frijolera de Zacatecas. En la Figura 9.2, se aprecia el comportamiento de la precipitación de la estación climatológica de la Colonia González Ortega, en el Distrito de Desarrollo Rural de Río Grande, donde el año Neutro o Normal se ejemplifica con 1995. En un año normal, como 1995, el inicio de las lluvias es durante el mes de junio, tiene un máximo de lluvias en el mes de julio y desciende en el mes de agosto para terminar en septiembre. Para el caso de un año donde se presentó el fenómeno del niño extremo, correspondiente al año 1997, como se observa, comenzó a llover desde enero y febrero, bajando los niveles de precipitación durante los meses de julio y agosto hasta el final del ciclo, lo que se traduce en un largo período de sequía que afecta los períodos de floración e inicio de formación del grano del frijol, con la consecuente pérdida de la producción. Finalmente, el año de 1998 es el ejemplo de “La Niña”, que se manifestó con un inicio de ciclo seco, un incremento de la precipitación a partir de la segunda mitad del mes de julio, llegando a un máximo en el mes de agosto y reduciendo en septiembre la precipitación, lo que indica que no se tuvo la presencia de un período intraestival de sequía en el ciclo de cultivo propiamente dicho, pero si posibles daños a las cosechas por exceso de humedad al final del ciclo.

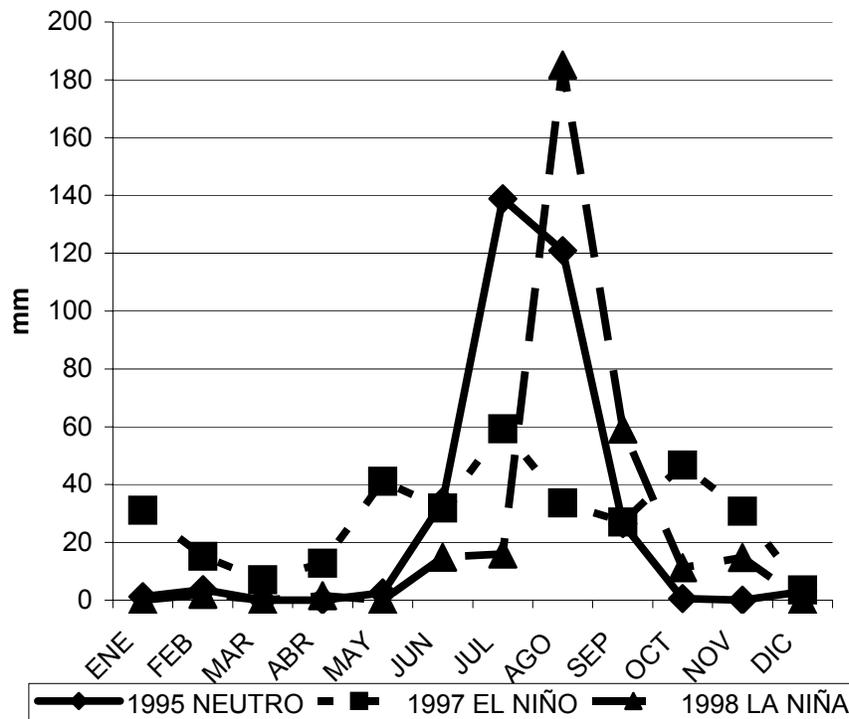


Figura 9.2. Distribución y cantidad de lluvia en la estación González Ortega, Sombrerete, Zacatecas. Fuente: Medina García, G. Elaboración propia.

Al reconocer el impacto de la sequía, y su agravamiento por la presencia de niños extremos, sobre la productividad agrícola del Estado, es necesario tomar medidas para contrarrestar su efecto de tal manera que ante tal amenaza, ésta se convierta en una oportunidad. La estrategia para convivir con el fenómeno de la sequía en Zacatecas debe buscar: la reducción de los siniestros, la incorporación de valor agregado y aseguramiento del precio de cosechas, la organización y capacitación de los productores, la implementación de programas de reconversión y diversificación productiva, y el estudio de su viabilidad. El diseño contempla la planeación participativa de los diferentes actores, la necesidad y oportunidad de evaluar la disponibilidad de herramientas e información relevante y fidedigna, tal es el caso de los estudios de potencial productivo, reconversión productiva, predicción de cosechas y mejoramiento genético con que cuenta el INIFAP para el estado de Zacatecas. De manera específica, se presentan a continuación tres estrategias que se han propuesto en el Estado para mitigar el efecto de las sequías intraestivales:

- a) **Conversión de cultivos:** a partir de los estudios de potencial productivo del INIFAP en Zacatecas se llevó a cabo la propuesta para convertir cultivos en áreas de bajo potencial y alto riesgo de pérdida de la cosecha en frijol. Se pretende tener a corto plazo cultivos alternativos que tengan mejores posibilidades en condiciones de sequía y reduzcan la pérdida de la capacidad productiva de los recursos naturales.
- b) **Reconversión productiva:** donde se lleva a cabo la propuesta para mejorar las condiciones productivas y ecológicas, a partir de un diagnóstico de campo y herramientas computacionales, en las áreas agrícolas de baja productividad en el ejido Pánuco, Zacatecas. El objeto de esta acción es el de definir áreas agrícolas, que por sus características agroecológicas, requieran de regresar a su aptitud productiva, y que den la oportunidad de precisar acciones en la toma de decisiones de las instituciones y de los propios productores.
- c) **Mejoramiento genético:** la propuesta del uso de variedades de maíz de ciclo corto como un mecanismo para reducir el riesgo de pérdida de producción durante la sequía se presenta como una tercera alternativa. El uso de estas variedades puede mejorar sustancialmente el rendimiento del maíz de temporal.

9.2. CONVERSIÓN DE CULTIVOS DE TEMPORAL EN EL ESTADO

9.2.1. Introducción

En 1992, el INIFAP inició los estudios de "Determinación del Potencial Productivo de Especies Vegetales en México". Este estudio incluyó a las 31 entidades federativas, el Distrito Federal y la región de La Laguna; el estudio abarcó no solamente el área agrícola sino que se extiende al área pecuaria y forestal; se incluyen otros cultivos de temporal además de los básicos, cultivos de riego y especies de importancia pecuaria y forestal. La herramienta es totalmente computarizado, donde se utiliza el "Modelo de Elevación Digital" (DEM) y otras variables de clima y suelo.

La productividad de las especies vegetales depende de muchos factores tanto del medio ambiente físico (clima y suelo), como del manejo controlado por el hombre en el caso de las plantas cultivadas.

Los factores edáficos varían fuertemente en el espacio, mientras que sus variaciones a través del tiempo en interacción con los elementos climáticos, son lentos y por lo tanto menos notorios; sin embargo, algunas características del suelo pueden ser modificadas favorable o desfavorablemente mediante las prácticas de manejo a corto o mediano plazo.

Por su parte, los elementos de clima varían fuertemente tanto en espacio como a través del tiempo (año) y como factores incontrolables únicamente pueden ser estudiados para conocer su variación de un lugar a otro y durante el año a fin de aprovechar sus beneficios al máximo, o bien, evitar sus daños.

Las plantas que se cultivan comercialmente tienen que estar en las condiciones más adecuadas del medio físico para que se logre obtener la mayor productividad en forma sostenida y como consecuencia las mayores utilidades respecto a las inversiones que se realizan, así como lograr la mayor eficiencia energética y la conservación de los recursos.

Para determinar el potencial productivo de las plantas, es necesario utilizar bases de datos del medio físico que permitan caracterizar el recurso existente. Desafortunadamente, las bases de datos de clima y suelo no están disponibles ni sistematizadas en forma electrónica para su fácil manejo. Por ello una parte de esta acción contempló la captura (digitalmente) de información para tenerla accesible para cualquier usuario, y por otra, determinar el potencial productivo de las especies el cual está determinado por las interrelaciones que existen entre especie, clima, suelo y manejo. Afortunadamente parte de estas relaciones están estudiadas y son conocidas, por lo que se considera factible lograr sistematizar una base de datos que servirá para planear actividades de investigación y transferencia de tecnología.

Este estudio complementado con un análisis económico, permitió identificar las ventajas comparativas de cada región y definir las especies vegetales (tradicionales y nuevas) que sean más rentables y competitivas.

9.2.2. Descripción demográfica y agroecológica

Ubicado en la región Norte-Centro del país, el estado de Zacatecas se localiza entre los paralelos 21° 00' y 25° 10' de latitud norte y los meridianos 100° 45' y 104° 25' de longitud oeste. Limita el este con el estado de San Luis Potosí, al oeste con Durango y Nayarit, al norte con el estado de Coahuila y Durango, y al sur con Jalisco y Aguascalientes. El Estado cuenta con una superficie total de 7.3 millones de hectáreas y alberga a una población de 1, 336,496 habitantes (1.6% de la población nacional). La población económicamente activa se estima en 475,446 habitantes, de los cuales aproximadamente el 40% se ocupa en

actividades agropecuarias y forestales. De la superficie total de la entidad, alrededor de 1.3 millones de hectáreas son de uso agrícola, de estas el 88% son temporal y el 12% de riego; 657 mil hectáreas tienen uso forestal y casi 5 millones de hectáreas corresponden a agostaderos y matorrales para uso pecuario.

La participación del sector agropecuario y forestal primario, en el PIB de la entidad, se ubica en promedio en el 23%. El sector agropecuario en el Estado de Zacatecas, opera a través de ocho Distritos de Desarrollo Rural: Zacatecas, Fresnillo, Río Grande, Tlaltenango, Jalpa, Jerez, Ojocaliente y Concepción del Oro; los que en su conjunto agrupan a 57 Municipios.

Debido a la amplia variación topográfica y orográfica, con altitudes que van desde 1500 hasta más de 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm), predominando las alturas de 2000 a 2500 msnm, esta entidad presenta amplia diversidad de climas, suelos y vegetación. En la entidad prácticamente se encuentran los climas BS que corresponden a climas de estepa y los BW que corresponden a climas de desierto. Los principales grupos de suelos son: Xerosoles, Yermosoles, Cambisoles y Litosoles, siendo los Xerosoles y Yermosoles los predominantes en el área agrícola.

En el estado de Zacatecas se reconocen cuatro grandes zonas agroecológicas: subtropical árido semicálido, subtropical árido templado, subtropical semiárido semicálido y subtropical semiárido templado. La descripción de las cuatro zonas es como sigue:

Subtrópico árido templado. Ocupa la mayor superficie (4,354,375 ha), con temperatura media de 5 a 18° C y en ningún mes la precipitación es mayor o igual a la evapotranspiración potencial. Los cultivos y las especies más importantes en esta zona son: frijol, maíz, nopal, durazno y cereales de grano pequeño.

Subtrópico árido semicálido. Representa una superficie aproximada de 1, 174,030 ha, con temperatura media de 18 a 22° C y en ningún mes la precipitación es mayor o igual a la evapotranspiración potencial. Los cultivos y las especies más importantes en esta zona son: especies de uso pecuario y especies forestales no maderables.

Subtrópico semiárido templado. Ocupa una superficie de 1,294,182 ha, con temperatura media de 5 a 18° C y de uno a tres meses la precipitación es mayor o igual a la evapotranspiración potencial. Los cultivos y las especies más importantes en esta zona son: maíz, nopal, durazno y cereales de grano pequeño.

Subtrópico semiárido semicálido. Representa una superficie de 548,565 ha, con temperatura media de 18 a 22° C y de uno a tres meses la precipitación es mayor o igual a la evapotranspiración potencial. Los cultivos y las especies más importantes en esta zona son: maíz, sorgo, guayabo y especies de uso pecuario.

La precipitación pluvial anual promedio en el estado es muy variable, entre 250 y 800 mm, y la mayor proporción (75%) ocurre durante el verano. (Figura 9.3).

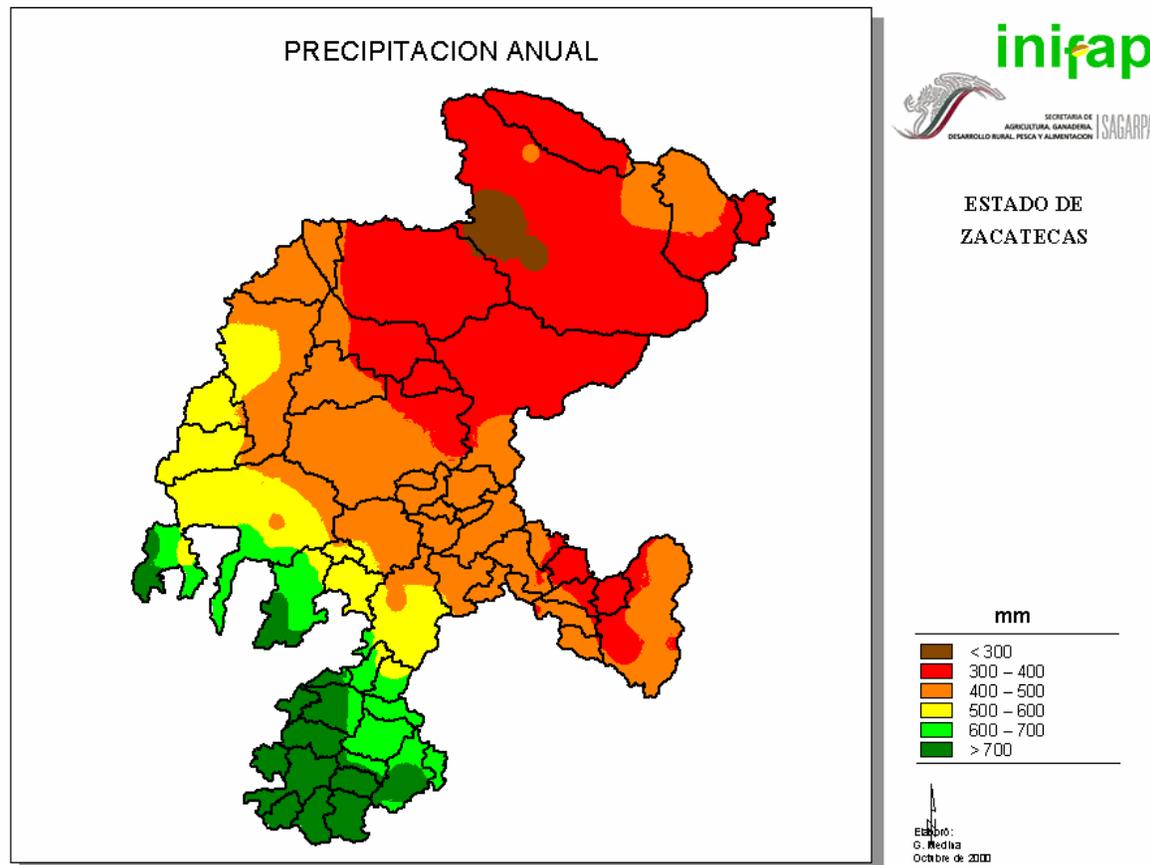


Figura 9.3. Precipitación anual en el estado de Zacatecas. Fuente: Medina García, G. 2000. Elaboración propia.

9.2.3. Descripción productiva del estado

La agricultura de la entidad es principalmente de temporal, con siembras promedio de un millón de hectáreas; mientras que la agricultura de riego ocupa una superficie total de alrededor de 146 mil hectáreas; con predominio del minifundio y el monocultivo principalmente de frijol, por lo que a la mayor parte de las unidades de producción se les tipifica como de subsistencia, con bajos niveles de tecnificación. El frijol para grano es el principal cultivo en el Estado, con una superficie de 650 mil hectáreas, seguido por el maíz con 312 mil, y cereales, avena y cebada maltera, que a últimas fechas están adquiriendo importancia entre los cultivos de riego y temporal, llegando a unas 60 mil hectáreas antes del programa de conversión de cultivos. Entre los frutales, destaca el durazno con 21 mil hectáreas, nopal tunero con 13 mil, vid y guayabo con 5 mil cada uno; entre las hortalizas el chile, ajo, cebolla y jitomate que suman una superficie de cerca de 25 mil hectáreas, aunque en algunos años esta superficie puede alcanzar las 40 mil (INEGI, 2001).

En Zacatecas, existe un promedio de un millón de cabezas de ganado bovino, de las cuales el 5% se dedican a la producción de leche; además, se tiene un promedio de 500 mil caprinos, 250 mil cerdos, 310 mil ovinos, 200 mil equinos, 2 millones de aves (gallinas y guajolotes) y 40 mil colmenas. El valor de la producción de carne en canal en el Estado es del orden de los 500 millones de pesos, donde destacan la carne de bovino (55%), porcino (26%) y equino (15%). Otros productos pecuarios tienen un valor económico de 580 millones de pesos, sobresaliendo la producción de leche de bovino, miel y huevo. De estos datos se desprende que el valor anual de la producción pecuaria en Zacatecas es del orden de 1,100 millones de pesos; a pesar de que el valor la población ganadera pueda ser del orden de 6,300 millones de pesos. El subsector ganadero del Estado genera aproximadamente el 36% del Producto Interno Bruto (PIB) del sector (INEGI, 2001). La estrategia de diversificación productiva del productor tiene que ver con el manejo de la incertidumbre de las actividades productivas del sector agropecuario, donde el productor persigue asegurar cuando menos una parte de su sistema al incluir diferentes especies, fechas de siembra, producción de forraje para su ganado, etc. (De Hoogh, 1999).

Por lo que respecta al renglón forestal, este sector es de menor importancia para el estado de Zacatecas. Se registra la explotación de especies forestales maderables como el encino, pino y mezquite. En el año 2000 se tuvo un volumen de producción en el orden de los 58 mil metros cúbicos destacando el encino (32 mil) y pino (26 mil) y de manera incipiente el mezquite; el municipio de mayor importancia es Valparaíso, de donde se obtiene el 90% de la producción maderable. El valor de la producción forestal maderable en Zacatecas es de 5.7 millones de pesos; lo que representa un porcentaje muy pequeño (0.01%) del total del sector agrícola, pecuario y forestal. La producción forestal no maderable es de alrededor de 5 mil toneladas, de las que más del 90% correspondieron al maguey mezcalero, además de nopal verdura, orégano y cera de candelilla. En términos de valor de producción el área forestal no maderable contribuye con 1.9 millones de pesos, de los que 1.6 millones correspondieron a la venta de orégano; esta información sugiere que a pesar de la importancia en superficie y producción del maguey mezcalero, éste tiene un precio y por lo tanto valor de la producción bajo (INEGI, 2001).

9.2.4. Procedimiento

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS por sus siglas en inglés) permite el manejo de bases de datos para generar mapas a partir de ciertas características y donde se establece un valor para aquellas áreas en el mapa que presentan homologías (Lal *et al.*, 1993), con la ventaja que la información está referida geográficamente. Independientemente del software disponible, un GIS está integrado por los siguientes elementos básicos (De Miranda *et al.*, 1995):

- a) Un subsistema de entrada de datos (mapas, bancos numéricos, etc.).
- b) Un subsistema de almacenamiento y recuperación de datos espaciales en una forma que posibilite un acceso eficiente.

c) Un subsistema de manejo de datos, que permita analizar y generar datos derivados de los básicos.

d) Un subsistema para presentación de los datos, tanto en forma tabular como gráfica (mapas).

Un GIS puede ser acoplado con un Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System, GPS), éste último utiliza la tecnología vía satélite para determinar la posición, en latitud y longitud, de un objeto determinado en prácticamente cualquier lugar de la tierra. Así el GIS, GPS y fotografías de satélite han sido usados en la descripción de los recursos naturales en un sistema de producción, por ejemplo (Hardin, 1999): a) para estimar el grado de contaminación ambiental, b) para estudiar los hábitats de la vida silvestre y c) la presencia de plantas nocivas. Por otro lado, la conjunción de modelos de simulación con un GIS abre la posibilidad de llevar a cabo análisis de productividad y simular el comportamiento de una especie en un área dada (Rumayor-Rodríguez *et al.*, 1998). Un GIS puede ser usado en trabajo de campo para definir factores o criterios que definan los recursos agua y suelo en estudios de regionalización (Chen y Liu, 1999). En este tipo de estudios es posible incluir variables como el tipo geomorfológico de suelo, litología, textura de suelo, tipo de suelo, estructura, profundidad del agua subterránea, grado de mineralización del agua, variación anual de la profundidad y explotación del agua subterránea, además de sales en el suelo, evaporación y temperaturas. Por otro lado, los GIS pueden usarse para analizar la información productiva, agrícola y pecuaria, a nivel granja, municipio o estado; Mrzeck (1999) propone el uso del GIS como herramienta de análisis básica de bases de datos con estadísticas agropecuarias en forma de mapas fáciles de comprender, usando gran cantidad de información y en tiempos de análisis factibles. Otras aplicaciones de los GIS, son aquellas en que se han usado como herramientas para decidir las áreas dentro de un predio que requieren fertilización (Lyons-Johnson, 1998), para priorizar actividades de restauración ecológica (Richardson y Gatti, 1999) y para estimar la erosión hídrica en cuencas hidrológicas (Cochrane y Flanagan, 1999).

La base de datos disponible para el estudio de potencial productivo en Zacatecas, a través de GIS, consta fundamentalmente de tres componentes:

a) Modelo de elevación digital.

El modelo de elevación digital procede de INEGI. En el caso de Zacatecas se tienen todas las imágenes con una resolución de 180x180 m. A partir de este modelo de elevación digital se generan imágenes de altitud en m.s.n.m. y pendiente en por ciento.

b) Base de datos de clima.

Se cuenta con datos diarios de clima del SMN para cada estado. A partir de ellos se generan los promedios y parámetros agroclimáticos necesarios de acuerdo a los requerimientos de los cultivos. Por medio de modelos de interpolación en Qbasic, se generaron imágenes de esas variables con la misma resolución de 180x180 m. Con la base de datos de clima dentro del GIS (IDRISI) se generan otras variables como temperatura media, índice P/E, horas frío y

unidades calor entre otras; es posible hacerlo para cada mes o cualquier período del año.

c) Base de datos de suelo.

Se digitalizaron las cartas edafológicas de INEGI escala 1:250,000, 1:50,000 o 1:1'000,000, utilizando el GIS ARC/INFO para obtener información de: unidades de suelo dominante, fases físicas, fases químicas, texturas, litosoles, cuerpos de agua y principales zonas urbanas.

9.2.4.1. Requerimientos de los cultivos

Los requerimientos para determinar las áreas con alto potencial productivo de las especies de temporal actuales y alternativas fueron proporcionados por los investigadores del INIFAP especialistas en los cultivos en estudio o bien expertos de otras instituciones para cuando no se tenía un especialista del INIFAP que pudiera proporcionar información.

9.2.4.2. Delimitación de zonas de alto potencial productivo

Con los tres componentes de la base de datos en el software IDRISI, se generaron imágenes de elevación, pendiente, clima y suelo. Dichas imágenes se reclasificaron con variables de engaño (0 y 1), de acuerdo a la clasificación de los requerimientos para lograr un alto potencial productivo de las especies de interés, asignando un cero a aquellos que no cumplían con las necesidades; los mapas individuales generados se sobreponen (multiplican) por pares, incluyendo todas las imágenes (variables o factores de producción) que intervienen; finalmente, se restan las superficies ocupadas por litosoles, cuerpos de agua y principales zonas urbanas, hasta llegar a la imagen final a la que se le cuantificó su superficie. Para alcanzar el alto potencial de rendimiento de las distintas especies vegetales es necesario la aplicación de la tecnología adecuada, como son los paquetes tecnológicos disponibles, los que se deberán aplicar correctamente para tener el rendimiento especificado.

9.2.5. Superficies actuales y potenciales de especies en el estado

Los resultados de estudios de potencial productivo han determinado que en el Estado existe un potencial para el cultivo de maíz en 115 mil hectáreas (ha), con un rendimiento potencial de 0.75 toneladas por hectárea (ton/ha), lo que representa un volumen de producción estatal de 90 mil toneladas de grano. En la actualidad, se está sembrado una superficie promedio de 300 mil ha; esto es 185 mil ha más que se encuentran en el área de bajo potencial para el maíz, obteniéndose en esta superficie un rendimiento promedio de 0.2 ton/ha y un volumen total de producción aproximada 37 mil ton, cabe hacer notar que esta superficie presenta un alto índice de siniestralidad. Esto significa que con la siembra de la superficie potencial y con la aplicación de un paquete tecnológico adecuado, se obtendría el mismo volumen de producción que se obtiene en la superficie actual.

En el caso del frijol, en el Estado se siembran un promedio de 700 mil ha, existiendo una superficie potencial de 230 mil ha, esto sugiere que alrededor de 470 mil ha se tienen en áreas definidas como potencial bajo para este cultivo

(Figura 9.4). El rendimiento promedio obtenido en la actualidad de la superficie sembrada es de 0.35 ton/ha; con la tecnología disponible es factible obtener rendimientos de hasta 0.5 ton/ha promedio.

A continuación se presentan los análisis de la superficie actual contra la potencial así como los rendimientos actuales y potenciales de los cultivos de frijol y maíz de temporal que ocupan más del 90 % de la superficie cultivada en este régimen, y la de cultivos que se pueden establecer como alternativas (Cuadro 9.2). La información sobre esta superficie se discute por cada Distrito de Desarrollo Rural (DDR).

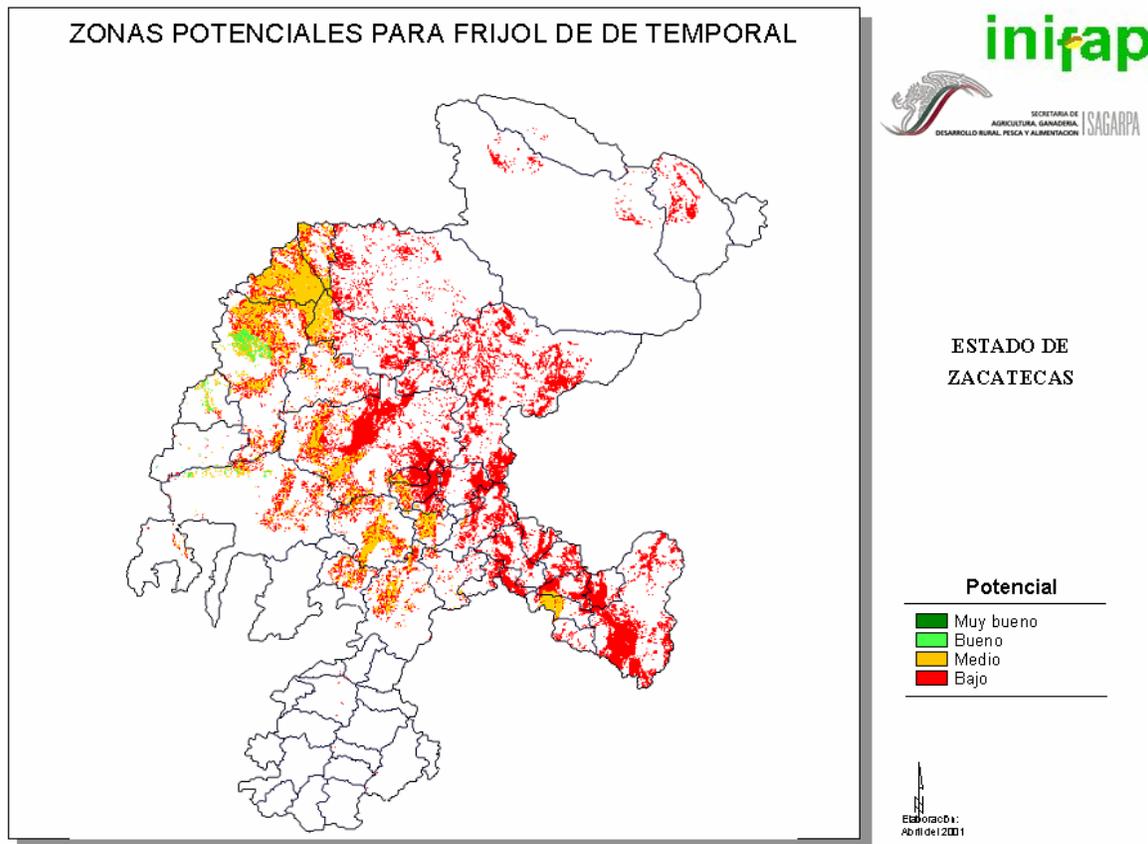


Figura 9.4. Áreas potenciales para frijol de temporal en el estado de Zacatecas.

Zacatecas.- En la información sobre las superficies actuales y potenciales de cultivos de temporal, en el DDR de Zacatecas, se siembra una superficie mayor de maíz y frijol que la superficie potencial, en el primer caso con 38 mil hectáreas y en el segundo con 118 mil has arriba de la superficie potencial. Por el contrario, los casos de cebada, pastos, nopal y chamizo presentan superficies en este distrito muy por abajo del potencial que tienen estas especies vegetales; sobresaliendo la cebada, nopal y arbustivas, como el chamizo.

Fresnillo y Jerez.- Para los distritos de Fresnillo y Jerez, la situación es similar en términos generales pero de menor magnitud la superficie extra con que se cuenta en maíz y frijol, con diferencias similares en el desaprovechamiento de superficies potenciales en cultivos como el nopal, pastos y cebada.

CUADRO 9.2. Superficie actual y potencial de cultivos de temporal en el estado de Zacatecas.

ESPECIES	TOTAL ESTATAL		
	ACTUAL	POTENCIAL	DIFERENCIA
FRIJOL	697,672	232,127	-465,545
MAIZ	310,000	115,144	-194,856
CEBADA	11,800	129,500	117,700
AVENA FORRAJERA	95,793	473,942	378,149
PASTO NAVAJITA	-	1,609,072	1,609,072
PASTO BANDERILLA	-	2,070,301	2,070,301
PASTO LLORÓN	-	708,420	708,420
NOPAL TUNERO	14,700	875,272	860,572
CHAMIZO	-	1,061,424	1,061,424

- Superficie actual: SAGARPA 2001-2002
- Superficie Potencial: Se incluyó el potencial Bueno y Muy Bueno. Para frijol y maíz también se considero mediano potencial.
- En el caso de pastos y chamizo no se anotó ninguna información actual, ya que no se dispone de datos precisos.

Jalpa.- El distrito de Jalpa parece ser el más equilibrado en sus superficies, incluso con una subutilización del área potencial de cada uno de los cultivos o especies presentadas; sin embargo, cabe hacer notar que la dificultad en la topografía restringe el uso de las áreas agrícolas.

Río Grande.- Para el distrito de Río Grande se tiene un excedente de la superficie de frijol, en alrededor de 160 mil has, y la posibilidad de incrementar la superficie de cebada y pastos es clara.

Concepción del Oro.- En el distrito de Concepción del Oro, el potencial agrícola es muy poco en superficie e importancia actual; es claro que los estudios de potencial sugieren plantaciones de nopal y arbustivas como el chamizo.

Tlaltenango.- El caso de Tlaltenango es similar al de Jalpa, con superficies más o menos acordes con el potencial productivo de las distintas especies sembradas.

Ojocaliente.- El análisis de la situación de Ojocaliente indica que es necesario reducir la superficie sembrada con frijol en áreas de bajo potencial y reemplazarla con cebada y nopal, a pesar de que este es el distrito con las mayores plantaciones de nopal tunero.

La metodología usada permitió realizar un análisis de la situación de las superficies actuales y potenciales por especie. En la Figura 9.5 se presenta un

mapa con el nivel de precisión adecuado para poder programar por especie sus áreas potenciales dónde puedan definirse programas de estímulo a la siembra de estos cultivos; en esta Figura, se presentan de manera excluyente las áreas de buen potencial para las cinco especies referidas, dando prioridad al cultivo de frijol el cual puede cubrir una superficie de 176 mil ha, luego maíz que puede establecerse en 86 mil ha, la siembra de cebada en 119 mil y avena forrajera en 325 mil; además, se tiene el potencial para establecer 440 mil ha con pastos, 255 mil ha con nopal y 890 mil con chamizo.

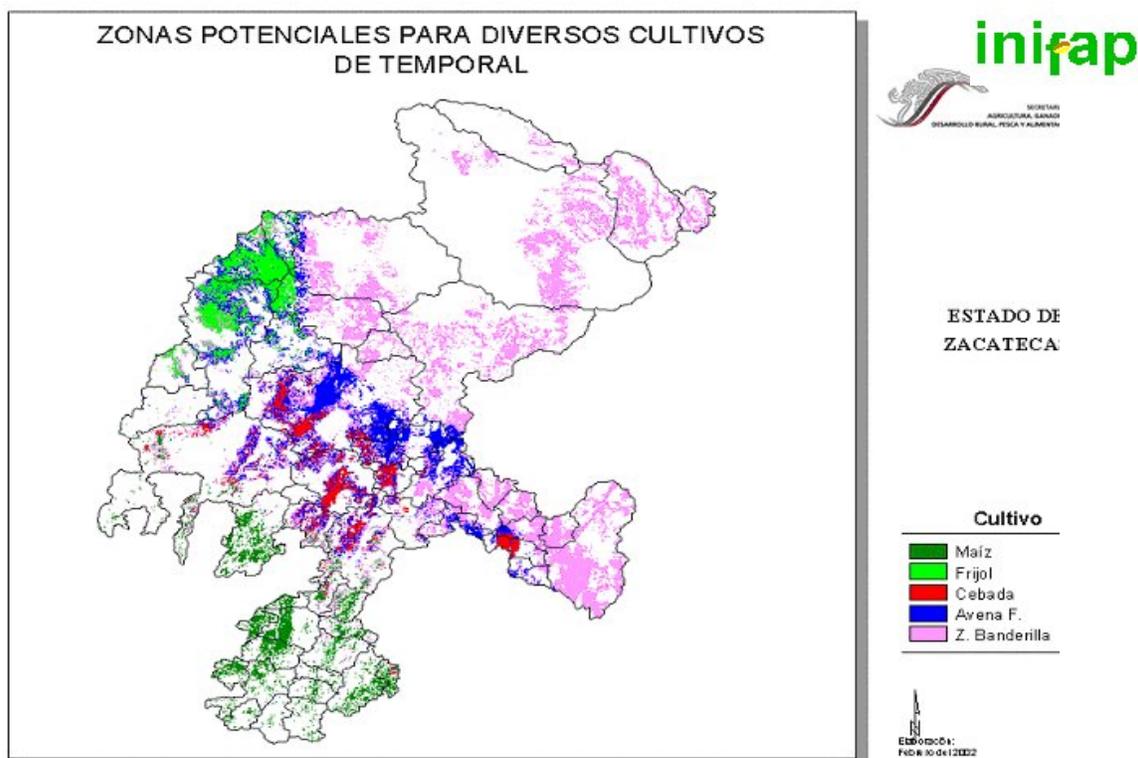


Figura 9.5. Áreas potenciales para la siembra de temporal de diversas especies vegetales.

Una vez analizada la situación de las superficies actuales y potenciales, es importante señalar que en general, el INIFAP y otras instituciones cuentan con tecnología para incrementar de manera significativa los rendimientos actuales de las especies incluidas en este estudio sobre la conversión productiva de cultivos.

9.2.6. Análisis de rentabilidad para el cultivo del frijol en Zacatecas

Como una acción complementaria a la información de potencial productivo, se llevó a cabo un análisis de rentabilidad del cultivo de frijol de temporal, el de mayor importancia en el Estado, para los diferentes distritos (Cuadro 9.3). El análisis enfatiza el diferencial entre el ingreso obtenido por el productor y el costo de producción, para el año 2003. Sin embargo, los valores comparativos entre los diferentes niveles de potencial o tecnológicos dentro de cada distrito son de mayor importancia, ya que el objeto es poder definir en qué áreas productoras se tienen

mayores expectativas para poder hacer competitivo el cultivo del frijol. Los datos calculados para las medias históricas de rendimiento en cada uno de los distritos sugieren que en ningún caso es rentable la producción de frijol. Cabe hacer notar que en los cálculos de rentabilidad se consideran los costos de mano de obra aportados por el productor, cosa que generalmente el productor no incluye, y que además se incluye el apoyo que recibieron los productores por PROCAMPO. Así mismo, para obtener un análisis más objetivo, se consideraron los rendimientos promedios obtenidos y las áreas potenciales por municipio. De manera general, aquellas áreas catalogadas como de alto y medio potencial, en las que el rendimiento varía de acuerdo con el DDR y municipio, tienen potencial para aplicar tecnología y ser rentables para el cultivo del frijol.

En los distritos de Ojocaliente y Concepción del Oro, el potencial productivo es únicamente de nivel bajo y la rentabilidad es negativa; aunque la aplicación de tecnología puede tener un impacto positivo en los niveles de ingreso, se considera que el riesgo de siniestralidad es alto. La mayoría de la producción en estas áreas es para autoconsumo y rara vez se tienen excedentes para su venta. Esta situación lleva a plantear la necesidad de definir programas gubernamentales para reducir los riesgos de pérdida de la producción. En este sentido, se identificó que 21 municipios de los 57 del Estado, ubicados en los DDR de Concepción del Oro, Zacatecas, Jerez y Ojocaliente presentan rendimientos inferiores a los 280 kilogramos por hectárea y altos índices de siniestralidad que llegan hasta el 70%, es decir en 7 de 10 años se tienen riesgos de pérdida de la producción. La superficie sembrada con frijol actualmente en esta situación es del orden de las 240 mil hectáreas. Se ha sugerido que para estas áreas las acciones se deben centrar en: a) el pago de PROCAMPO y sin que siembren frijol, es lo que se ha manejado como el PROCAMPO ecológico; b) establecer un programa multi anual de reconversión productiva donde se establezcan otras opciones agrícolas, forrajeras, pastos y arbustivas, de modo que se regrese a la aptitud natural de estos suelos.

Se puede notar que para los distritos de Zacatecas y Fresnillo, los rendimientos históricos de las áreas identificadas como de medio y bajo potencial tienen un diferencial ingreso-costos negativo, lo mismo se puede comentar del bajo rendimiento con la tecnología INIFAP propuesta. Para estos dos distritos, solamente se tienen expectativas de ingresos positivos para el productor en el área de medio potencial y con la aplicación de tecnología para mejorar la productividad actual, de manera específica los municipios de Fresnillo, Calera, Morelos y Zacatecas. En el DDR Jerez, un distrito con relativamente poca producción de frijol, el análisis llevado a cabo sugiere que esta especie puede ser una alternativa viable al aplicar tecnología que permita mejorar los rendimientos, esta posibilidad se presenta en las áreas de alto y medio potencial, particularmente en los municipios de Jerez y Villanueva. En estas áreas catalogadas como de producción media, se tienen rendimientos medios que van de 300 a 400 kilogramos por hectárea y se siembran en la actualidad alrededor de 46 mil hectáreas que pueden entrar en un esquema de conversión de cultivos, particularmente cebada maltera y cultivos forrajeros, además de inducir el uso de

pileteo como un esquema de mejoramiento de la productividad al incrementar la captación *in situ* de la precipitación.

CUADRO 9.3. Distritos de Desarrollo Rural, potencial productivo, costo de producción, rendimiento, ingresos y diferencial ingreso-costo (2003) para el cultivo del frijol de temporal en el estado de Zacatecas.

Distritos de Desarrollo Rural	Condición Productiva	Potencial	a.- Costo de cultivo \$/ha.	b.- Rendimiento (ton/ha)	c.- Precio pagado al productor \$/ton	Composición del Ingreso por Hectárea			Diferencial Ingreso/costo (f - a)
						d.- Valor de la producción (b x c)	e.- Procampo	f.- Total (d + e)	
Zacatecas	Media Histórica	Medio	2,675.00	0.303	3,500.00	1,060.50	905.00	1,965.50	-709.50
		Bajo	2,675.00	0.248	3,500.00	868.00	905.00	1,773.00	-902.00
	Potencial INIFAP	Medio	2,675.00	0.700	3,500.00	2,450.00	905.00	3,355.00	680.00
		Bajo	2,675.00	0.400	3,500.00	1,400.00	905.00	2,305.00	-370.00
Fresnillo	Media Histórica	Medio	2,497.00	0.337	3,500.00	1,179.50	905.00	2,084.50	-412.50
		Bajo	2,497.00	0.278	3,500.00	973.00	905.00	1,878.00	-619.00
	Potencial INIFAP	Medio	2,497.00	0.700	3,500.00	2,450.00	905.00	3,355.00	858.00
		Bajo	2,497.00	0.400	3,500.00	1,400.00	905.00	2,305.00	-192.00
Jerez	Media Histórica	Alto	2,510.00	0.350	3,500.00	1,225.00	905.00	2,130.00	-380.00
		Medio	2,510.00	0.450	3,500.00	1,575.00	905.00	2,480.00	-30.00
	Potencial INIFAP	Alto	2,510.00	1.000	3,500.00	3,500.00	905.00	4,405.00	1,895.00
		Medio	2,510.00	0.700	3,500.00	2,450.00	905.00	3,355.00	845.00
Río Grande	Media Histórica	Alto	3,975.00	0.627	4,500.00	2,821.50	905.00	3,726.50	-248.50
		Medio	3,975.00	0.572	4,500.00	2,574.00	905.00	3,479.00	-496.00
		Bajo	3,975.00	0.498	4,500.00	2,241.00	905.00	3,146.00	-829.00
	Potencial INIFAP	Alto	3,975.00	1.000	4,500.00	4,500.00	905.00	5,405.00	1,430.00
		Medio	3,975.00	0.700	4,500.00	3,150.00	905.00	4,055.00	80.00
		Bajo	3,975.00	0.500	4,500.00	2,250.00	905.00	3,155.00	-820.00
Concepción del Oro	Media Histórica	Bajo	1,510.00	0.138	3,500.00	483.00	905.00	1,388.00	-122.00
	Potencial INIFAP	Bajo	1,510.00	0.250	3,500.00	875.00	905.00	1,780.00	270.00
Ojocaliente	Media Histórica	Bajo	2,055.00	0.230	3,500.00	805.00	905.00	1,710.00	-345.00
	Potencial INIFAP	Bajo	2,055.00	0.400	3,500.00	1,400.00	905.00	2,305.00	250.00

El DDR Río Grande presenta los niveles de rendimiento e inversión más alta; en este distrito la aplicación de tecnología es rentable, particularmente en el área de alto y medio potencial.

9.2.7. Propuesta de conversión de cultivos de temporal

A partir del análisis anterior, a continuación se presenta por Distrito de Desarrollo Rural las especies y cultivos que se sugieren pueden ser usadas para la conversión de cultivos bajo condiciones de temporal; buscando disponer de alternativas con mejor adaptación agroecológica y con menor fragilidad en la pérdida de los recursos naturales.

Distrito de Desarrollo Rural Zacatecas

En el DDR de ZACATECAS, los cultivos de frijol y maíz se siembran en una superficie mayor de lo que el estudio de potencial productivo indica. Los cultivos de cebada maltera, nopal, arbustivas (chamizo) y resiembra de pastos (banderilla y navajita) ofrecen una alternativa de cambio del uso del suelo en este distrito. Para este distrito la propuesta de conversión de cultivos indica que la mayor parte del frijol que se siembra en este distrito se hace en zonas de bajo potencial; se puede comentar la misma situación para el maíz.

Se sugiere para este distrito reducir la superficie sembrada con frijol y particularmente la sembrada con maíz. Los cultivos alternativos pueden ser la cebada maltera sembrada como cultivo principal, no como emergente, y dada la presencia de la empresa maltera en este distrito, además de avena forrajera y pastos para reducir la presión sobre la producción forrajera en los agostaderos. En relación al impacto negativo que se pudiera tener en la producción estatal de frijol, al reducir la superficie, cabe hacer notar que incrementando el nivel de tecnología en las áreas de buen potencial, se puede mantener la producción sin crear un desabasto de esta gramínea.

Distrito de Desarrollo Rural Fresnillo

Para el DDR de FRESNILLO, se sugiere que la superficie sembrada con maíz y frijol sea únicamente en las áreas de buen potencial, en alrededor de 80 mil has, e incluir opciones de menor riesgo con los cultivos de cebada maltera, avena forrajera, nopal, y zacate llorón, los cuales podrían ser una alternativa de cambio de uso del suelo para este distrito. A pesar de la reducción de la superficie de frijol, ésta se compensa con un incremento en la producción por hectárea, si se siembra sólo en las áreas de bueno y mediano potencial, el incremento en rendimiento puede ser en el orden de un 16%. En cambio para maíz, aunque se puede tener un incremento en la producción, el ingreso neto final resulta negativo. La cebada produciendo un rendimiento potencial de 2 ton/ha también tiene un ingreso neto positivo aunque inferior al frijol; mientras que la avena forrajera se considera una alternativa importante para productores agrícolas que cuentan con ganado y que les permita producir forraje para la época de estiaje.

Distrito de Desarrollo Rural Jerez

En el Distrito de Jerez, se siembran bajo condiciones de temporal alrededor de 50 mil has, con frijol, maíz y avena forrajera, ubicándose estas superficies en áreas de bajo potencial. Se sugieren opciones para llevar a cabo la reconversión productiva como cebada maltera, avena forrajera y zacate llorón. Para este distrito la propuesta de conversión indica una reducción en la superficie de maíz y casi la misma superficie de frijol y trigo y un incremento importante en los cultivos de cebada, pastos y nopal tunero. En este distrito también el ingreso neto del frijol es mayor, el de maíz es negativo y el de cebada se acerca más al de frijol.

Distrito de Desarrollo Rural Jalpa

En el Distrito de Jalpa, se siembran principalmente bajo condiciones de temporal los cultivos de maíz y sorgo para grano, ocupando una superficie de 31

mil has. De acuerdo con los estudios para este distrito, los cultivos anteriores son los de mayor potencial, por lo que es necesario elevar la productividad de los mismos a través del uso de la tecnología disponible para estos cultivos. La propuesta de conversión para este distrito, es incrementar el nivel de tecnología en el cultivo de maíz para alcanzar el rendimiento potencial, ya que de esta manera con este cultivo se tiene el mayor ingreso neto de los cultivos básicos.

Distrito de Desarrollo Rural Río Grande

En el Distrito de Río Grande los principales cultivos que se establecen bajo condiciones de temporal son frijol, maíz, cebada maltera y avena forrajera, los cuales ocupan una superficie de aproximadamente 400 mil ha, que de acuerdo a los estudios de potencial productivo quedan ubicadas en zonas de mediano y buen potencial. Sin embargo, para el caso de frijol, los resultados del estudio de potencial productivo únicamente reportan 150 mil ha entre bueno y mediano potencial en este distrito. De tal manera que para mantener los volúmenes de producción generados de esta leguminosa, en la superficie con potencial, se requiere utilizar la tecnología generada para este cultivo y elevar la productividad del mismo. En el resto de la superficie, la alternativa puede ser incrementar las siembras con cebada maltera y avena forrajera como cultivo principal, y algunas especies forrajeras como pastos y chamizo. Para este distrito se sugiere aumentar el nivel de tecnología en aproximadamente 150 mil hectáreas con bueno y mediano potencial en frijol. Pueden ser alternativas la avena forrajera y la cebada los cuales tienen ingresos netos positivos, considerando el apoyo del programa de conversión de cultivos.

Distrito de Desarrollo Rural Concepción del Oro

En el Distrito de Concepción del Oro, los estudios de potencial productivo indican que existe bajo o nulo potencial para cultivos básicos, por lo que la alternativa más viable para este distrito son especies arbustivas (chamizo), pastos y especies forestales no maderables.

Distrito de Desarrollo Rural Ojocaliente

En el Distrito de Ojocaliente, los estudios de potencial productivo indican que existe bajo potencial para cultivos como maíz y frijol, aún cuando se tiene una superficie promedio sembrada con estos cultivos de 148 mil ha, y únicamente 5 mil ha con cebada para grano. Las alternativas más viables para este distrito son nopal para tuna y verdura, así como cebada maltera y especies arbustivas y pastos. En este distrito el cultivo de frijol a pesar de que se siembra en áreas de bajo potencial, el ingreso neto resulta positivo aplicando la tecnología apropiada; no así para el maíz y la cebada. El nopal tunero si tiene un buen ingreso neto y la superficie pudiera ser factible de incrementarse considerando el mercado de la producción.

Distrito de Desarrollo Rural Tlaltenango

En el Distrito de Tlaltenango, se siembra principalmente bajo condiciones de temporal el cultivo de maíz, ocupando una superficie de 13 mil ha. De acuerdo con los estudios de potencial productivo para este distrito, los cultivos de maíz y

frijol son los de mayor potencial, por lo que es necesario elevar los rendimientos de los mismos a través del uso de la tecnología generada para estos cultivos. Además de diversificar con especies forrajeras y pastos. Al igual que en el distrito de Jalpa, la propuesta de conversión, es incrementar el nivel de tecnología en el cultivo de maíz para alcanzar el rendimiento potencial, ya que de esta manera con este cultivo se tiene el mayor ingreso neto de los cultivos básicos. En las zonas templadas de este distrito también pueden ser alternativos los cultivos de resiembra de pastizales.

9.3. RECONVERSIÓN PRODUCTIVA. EL CASO DEL EJIDO PÀNUCO DE ZACATECAS

9.3.1. Introducción

El término reconversión es usado para referirse a la acción de cambiar la actividad productiva de áreas de baja aptitud productiva hacia una actividad de menor nivel extractivo (DOF, 2002), como en el caso de cambiar de la actividad agrícola hacia la pecuaria. Los estudios agrológicos o de uso potencial empezaron a usarse en México a partir del año de 1968. CETENAL (CETENAL, 1968, 1973) desarrolló un sistema de clasificación de la capacidad agrológica, que permitió clasificar los suelos de acuerdo con su capacidad productiva. Sin embargo, en muchos casos los criterios de uso potencial no fueron considerados por los productores, y se abrieron al cultivo suelos de baja aptitud productiva, los cuales no alcanzarían el nivel mínimo necesario para considerarse aptos para el uso agrícola.

Para rescatar aquellas áreas que erróneamente se abrieron al cultivo, se requiere la identificación de las mismas con procedimientos sencillos que permitan actualizar la información disponible y separar las áreas de menor aptitud. Debido a ello, se ha optado por el uso de indicadores de fácil identificación y muestreo que presenten características como correlación espacial, y permitan la interpolación y el mapeo (Gotway *et al.*, 1996; Liebhold *et al.*, 1993).

Utilizando como base los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se han desarrollado diferentes trabajos de investigación y de aplicación en muy diversas áreas, como es la determinación del potencial productivo de especies vegetales en México, con el que se determinó el potencial de especies de uso agrícola, pecuario y forestal y bajo condiciones de riego o de temporal (Medina *et al.*, 1997).

Los SIG se han usado como una herramienta para desarrollar nuevos mapas, a través de la sobreposición de mapas ya existentes, que generalmente son la representación geográfica de una variable (De Mers, 2000). A través de este proceso es posible obtener un mapa que represente geográficamente, por ejemplo, un sistema de clasificación de productividad del suelo, definiendo previamente los rangos de las variables que dan origen a los diferentes niveles de la clasificación. Además de generar mapas a partir de información de campo y de modelos matemáticos como la “ecuación universal de pérdida del suelo” (USLE, por sus siglas en inglés) (Wischmeier y Smith, 1978).

Las labores de planeación estratégica deberán contar siempre con estudios previos en el área. Este estudio es un intento por utilizar información disponible, la cual tiene la característica de que permite su manejo con herramientas de análisis espacial (SIG's). Estas herramientas dan a los estudios de grandes superficies, la precisión necesaria para dirigir las acciones a los sitios en que realmente se necesita la intervención tecnológica.

El ejido Pánuco tiene una superficie de 4,914 ha de las cuales 2,470 son usadas como agostadero comunal y 2,444, son usadas con fines agrícolas. Se ubica entre los 102°27' y 102°33' Oeste y 22°55 y 22°51' Norte; su delimitación se realizó por medio de un recorrido por el perímetro, y la ubicación de las coordenadas geográficas de los vértices. La precipitación media anual es de 400 mm y la temperatura media anual es 15° C. La fisiografía varía desde escarpada (2,400 msnm) al sur del ejido, hasta ondulada y plana (2,125 msnm) al noreste. De acuerdo con la clasificación FAO/UNESCO modificada por CETENAL, el suelo predominante es el Litosol eutrítico, que se encuentra distribuido en 91.5 % de la área de agostadero y 36 % de la área agrícola. El Xerosol lúvico es el segundo en importancia y se distribuye en el 54 % de la área agrícola y el 8.5 % de la área de agostadero. Un tercer tipo de suelo es el Castañozem lúvico que se distribuye sólo en 4.4 % al noreste de la área agrícola. De acuerdo a COTECOCA (1980), el tipo de vegetación es matorral mediano espinoso, donde la vegetación predominante es "pastizal nativo-matorral espinoso-nopalera", con predominio en algunas áreas por pastizal y nopalera, representada principalmente por diversas variedades de nopal silvestre (*Opuntia Leucotricha* D.C., *Opuntia streptocantha* Lem, *Opuntia Rastrera* Weber, *Opuntia hyptiacantha* Weber, *Opuntia megacantha* Salm-Dick, y *Opuntia pachona* Griffiths). En el pastizal predominan las gramíneas (*Bouteloua curtipendula* Tenius Gould et, *Bouteloua gracilis* (HBK) Lag, *Aristida* spp, *Lycurus phleoides* HBK). El matorral espinoso está compuesto por algunas arbustivas y plantas anuales (*Acacia farnesiana* (L) Willd, *Prosopis laevigata* (Willd) M.C. Johnston, *Mimosa biuncifera* Benth y *Dalea bicolor*).

9.3.2. Procedimiento

En el área agrícola se colectaron 30 muestras de suelo distribuidas en función de características contrastantes de clase de suelo y topografía. Los sitios de muestreo fueron georeferenciados. Se determinó el porcentaje de materia orgánica (MO) en base a peso, y una muestra adicional de suelo fue tamizada (4.76, 2.38, 2, 1.41, 0.84, 0.59, 0.25, 0.044 mm) para evaluar el porcentaje del suelo (en base a peso) con partículas de diámetro menores a 2 mm, que es el diámetro máximo para que una partícula pueda ser considerada suelo, de acuerdo con los principales sistemas de clasificación.

En el agostadero se consideraron indicadores de planta (rendimiento de materia seca y cobertura basal) e indicadores de tipo hidrológico (erosión hídrica). Desde el año 1998 se realizaron mediciones periódicas del contenido de materia seca del estrato herbáceo dentro y fuera del área excluida en diez transectos de medición, con puntos de medición separados a 50 m. Para colectar la muestra se

usó un cuadrante 0.5 X 0.5 m y se colectó sólo el material herbáceo. Cada muestra fue georeferenciada. Asimismo, dos veces al año se realizaron mediciones de la cobertura basal usando un marco de puntos de 20 agujas. Las variables de cobertura fueron la cobertura basal del estrato herbáceo, mantillo orgánico, suelo desnudo, grava y roca; se consideró como mantillo orgánico el material vegetal muerto que ya no forma parte del pasto o de la planta anual. Para estimar los niveles de erosión, hídrica y eólica, en la superficie de agostadero se utilizaron una serie de modelos, como la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE). Finalmente, por medio de SIG se integraron las imágenes; con el procedimiento anterior se estimó la erosión hídrica potencial, la erosión hídrica para diferentes condiciones de vegetación nativa e inducida y la erosión hídrica para condiciones de pastoreo y exclusión. En todos los casos, las imágenes se trabajaron con una resolución de 3.24 ha por píxel.

9.3.3. Reconversión productiva

Dentro del área agrícola sobresalen los suelos de la clase xerosol, castañozem y fluvisol, los cuales, de acuerdo con FAO/UNESCO modificado por CETENAL, son suelos propios de zonas áridas y semiáridas del norte de México, y pueden ser usados para realizar agricultura de temporal. Sin embargo, existen 886 ha de suelos tipo litosol eutricto, cuya utilización agrícola está condicionada por la disponibilidad de humedad y por su reducida profundidad. Por otro lado, en el área de agostadero, se detectaron sólo dos clases de suelos, litosol y xerosol, predominando el primero, debido a que el agostadero se ubica en la parte alta y laderas de los cerros. Hay 208 ha de suelo de la clase xerosol dentro del área de agostadero comunal, los cuales son apropiados para actividades agrícolas, y presentan un mayor desarrollo que los litosoles. Generalmente presentan mayor profundidad del perfil y horizontes de acumulación de arcillas o precipitación de carbonato de calcio. Cuando los xerosoles están desprovistos de vegetación son más susceptibles a la erosión hídrica o eólica que los litosoles, por lo que pudieran estar más expuestos al deterioro.

9.3.3.1. Área agrícola

Los resultados del análisis geoestadístico indican que las variables materia orgánica y tamaño de partícula de suelo mayor a 2 mm, se correlacionan espacialmente. Como siguiente paso se generó un mapa para cada indicador; con estos mapas y con ayuda del sistema de información geográfica IDRISI, se obtuvo un tercer mapa, el cual integró ambos indicadores y produjo una nueva clasificación de los suelos que se detalla en el Cuadro 9.4. Las nuevas clases son combinaciones de ambos indicadores, y separan las clases de valores más bajos de materia orgánica, con los valores más altos de porcentaje de suelo con diámetro mayor a 2 mm, que se clasifican como de menor capacidad productiva. También, genera las clases opuestas, es decir, las de menor porcentaje de suelo con diámetro mayor a 2 mm, y valores altos de materia orgánica, las cuales son de mayor capacidad productiva.

Un tercer paso para separar los suelos de mayor susceptibilidad para ser reconvertidos, fue sobreponer los suelos de la clase litosol dentro del área

agrícola. De esta manera, los suelos de menor capacidad productiva de la clase litosol deberán ser reconvertidos hacia la actividad pecuaria. Los resultados indican que hay tres niveles de reconversión, los cuales son clasificados como áreas de actividad pecuaria como aptitud potencial. Los suelos de mayor necesidad de reconversión son 41 ha, los cuales son considerados como aptos para actividad pecuaria baja, seguidas por 161 que se clasificaron como aptos para actividad pecuaria media; un tercer grupo de 552 ha fue clasificado como de actividad pecuaria alta. En total la superficie dentro del área agrícola que fue clasificada como apta para actividades pecuarias es de 754 ha, y se ubica en su totalidad en la parte norte del ejido, la cual es una ampliación del mismo y que fue abierta al cultivo agrícola en los últimos años.

CUADRO 9.4. Clases de suelo, obtenidas a partir de la materia orgánica y partículas mayores a 2 mm, y su superficie incluida en el área agrícola del ejido pánuco, Zacatecas.

Características de suelo		Superficie	Denominación de clases potencial pecuario
Suelo > 2 mm (50-55%)	MO = 1 –1.5 %	41	Pecuaria, bajo potencial
	MO = 1.5 –2 %	161	Pecuaria media
Suelo > 2 mm (45-50%)	MO = 1 –1.5 %	552	Pecuaria alta
	MO = 1.5 –2 %		
Total		754	

Del total de la superficie de la clase litosol dentro del área agrícola (886 ha), sólo 133 hectáreas quedaron fuera de las clases obtenidas con la sobreposición de indicadores, lo que sugiere que no todos los suelos de la clase litosol deberán ser reconvertidos, sino sólo aquellos cuyo nivel de deterioro y limitaciones físicas hayan rebasado los niveles aceptables. Los planes de reconversión para estas áreas deberán incluir opciones tecnológicas que permitan incrementar la cobertura vegetal con especies de rápido establecimiento como cereales, pastos y en algunos casos con arbustos, además de la inclusión de prácticas mecánicas para incrementar la captación de humedad, lo que permitirá un regreso gradual a su condición inicial.

9.3.3.2. Agostadero

Los valores de erosión potencial son mayores en la clase de suelo xerosol que en la clase de suelo litosol (Cuadro 9.5). Cuando estos suelos se encuentran en áreas dedicadas al pastoreo, es necesario mantener una cubierta vegetal adecuada para evitar que la acción erosiva de la lluvia los degrade. La superficie ocupada por xerosoles en el área de agostadero comunal es de alrededor de 208

ha las cuales deberán ser consideradas como prioritarias en planes de conservación debido a su susceptibilidad a la erosión.

Los valores medios de erosión hídrica en el agostadero calculados a partir del estudio de Serna y Echavarría (2002), para diferentes niveles de cobertura ubican en primer lugar a los valores de erosión potencial en el agostadero sin cubierta vegetal; posteriormente la que se obtiene al establecer chamizo (*Atriplex canescens*) con bordos a nivel (2.2 t/ha) y la obtenida cuando se establecen chamizos en fosas asociados con nopal rastrero, usando este último como barrera protectora (1.47 t/ha). Por último, los niveles más bajos a la erosión en áreas de vegetación nativa bajo exclusión. Las cuatro condiciones se presentan en un gradiente de cobertura que va desde el matorral de cobertura baja, pastizal, matorral medio y una condición de máxima protección que es la de nopalera densa. Los valores más bajos de erosión se presentan en aquellos tratamientos donde no se realizó ningún movimiento de suelo y donde sólo se dio un tratamiento de exclusión o descanso del pastizal.

CUADRO 9.5. Niveles de erosión en el agostadero de acuerdo con su categoría y superficie incluida en cada clase en el ejido Pánuco.

Niveles de erosión en agostadero	Rango	Erosión media estimada (T/ha)	Desviación estándar	Superficie por clase de suelo (ha)
Erosión potencial en litosoles y xerosoles	0-150.95	11.072	11.378	2,470
Erosión potencial en litosoles	0-130.39	8.65	5.88	2,262
Diferencia atribuida a xerosoles	130 – 150	8.65 – 11.072	-----	208

En evaluaciones dentro del ejido Pánuco, y en otros seis sitios de estudio distribuidos en el Estado, se han registrado valores promedio de 20% de cobertura basal, lo que al contrastarse con el 60% de cobertura obtenido dentro del área de exclusión de Pánuco, muestra con claridad que existe un potencial de condición y productividad del pastizal que puede ser recuperado. La práctica inicial sugerida para la recuperación es el manejo del pastoreo rotacional (cuatro potreros), sin descartar la opción de revegetación para condiciones de deterioro mayores o de menor cobertura basal.

Es posible concluir que la superficie dentro del ejido Pánuco, susceptible de ser reconvertida hacia la actividad pecuaria dentro del área agrícola, presenta diferentes grados de falta de aptitud; el total de la superficie identificada para reconvertir es de 753 hectáreas y además de que esta superficie quedó documentada en términos de su posición geográfica. La superficie de agostadero

que requiere mayor atención en programas de mejoramiento de la condición, debida a su susceptibilidad a la erosión, es de 208 hectáreas. El descanso y un sistema de apacentamiento rotacional es una opción tecnológica para el agostadero de Pánuco, que permitirá una reducción en los niveles de erosión del ejido y una recuperación gradual. La práctica de revegetación no se descarta en áreas del agostadero de mayor degradación.

9.4. MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA RESISTENCIA A SEQUÍA EN MAÍZ

9.4.1. Introducción

En México se ha trabajado sobre resistencia a sequía en maíz desde antes de 1960 (Moncada, 1957; Palacios, 1959) y esta actividad mostró un auge significativo en las dos décadas siguientes (Luna y Gutiérrez, 1998). Se ha trabajado para siembras de temporal, donde se registran desde 400 hasta 1200 mm de precipitación anual; esto es, desde la Región Templada Semiárida y Árida del Centro Norte de México (RETSACEN), hasta la de Trópico Húmedo, para diferentes tipos de sequía. Los trabajos abarcan siembras de Primavera-Verano en casi todas las regiones y de Otoño-Invierno en Veracruz y Sinaloa. También se ha trabajado en la obtención de variedades eficientes en el uso del agua para siembras de riego, principalmente en Pabellón, Aguascalientes y Celaya, Guanajuato. Además del INIFAP, también han trabajado en la generación de variedades de maíz resistentes a sequía el Colegio de Postgraduados y la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, principalmente.

El presente artículo incluye solamente trabajos de mejoramiento genético de maíz del INIFAP para resistencia a sequía de la RETSACEN, área delimitada al principio de éste libro, en la cual la sequía es recurrente y se manifiesta con mayor daño al cultivo de maíz en México. Ésta región comprende el altiplano de los estados de Aguascalientes, Durango, San Luis Potosí y Zacatecas, así como el norte de Guanajuato y pequeñas porciones del norte de Jalisco y del sur de Coahuila. En ella se siembran en promedio por año 750 mil hectáreas de maíz de temporal, con precipitaciones que en general van de 250 a 450 mm en un ciclo de cultivo corto (100-120 días) y con temperaturas medias de 15-20° C (Luna, 1993).

La formación de variedades de maíz resistentes a sequía en la RETSACEN se ha hecho en Aguascalientes, Zacatecas y Durango, con el enfoque general de generar variedades de polinización libre y no híbridos, para que los productores no tengan que adquirir semilla cada vez que siembran, ya que el riesgo de pérdida por sequía o heladas es alto (20-50%) y los rendimientos esperados son bajos, principalmente por falta de agua (Luna, 1993), por lo que invertir en la compra de semilla híbrida encarece significativamente el costo del cultivo y la esperanza de su beneficio es baja. El mejoramiento genético de maíz resistente a sequía se ha acompañado del mejoramiento de prácticas culturales para captar y almacenar agua de lluvia, sobre la preparación del suelo para la siembra, la determinación de las fechas límite de siembra, densidades de plantas, fertilización y control de maleza y plagas, con los objetivos comunes de disminuir los riesgos de pérdida por sequía, disminuir los costos de producción e incrementar la productividad, sin

que ello afecte el medio ambiente. El objetivo del presente apartado es describir los principales trabajos que se han realizado en la RETSACEN para generar variedades de maíz resistentes a sequía, los estudios que confirman esa resistencia y los logros e impacto de ello, con la confianza de que por tratarse de resultados emanados de trabajos de investigación científica, quien los lea se convenza de que los puede aplicar y recomendar con una alta probabilidad de certeza.

9.4.2. Mejoramiento genético de maíz resistente a sequía

Antes del año 1975

La primera variedad resistente a sequía que se formó en el INIFAP y la RETSACEN se denominó Cafime y se liberó en 1958; ésta es producto de una prueba de temporal realizada en Francisco I. Madero, Durango en 1957, en la que se seleccionaron visualmente por resistencia a sequía y se mezclaron siete cruces A x B derivadas de la raza Bolita. En 1963, se liberó la variedad VS-201, derivada de Cafime, en Pabellón, Aguascalientes; se formó con la mezcla de “mestizos” de líneas S₁ sobresalientes en pruebas de temporal realizadas en Zacatecas y Durango, en las que el probador fue la variedad Cafime (Luna y Gutiérrez, 1998). Estas variedades eran de la misma precocidad que el promedio de los maíces criollos de aquella época (110-115 días a madurez fisiológica), pero rindieron en promedio 20 a 40% más, son de grano blanco y de los maíces mejorados más sanos que se han obtenido; por sus bondades, se siguen distribuyendo en la actualidad entre los productores de la RETSACEN. A través de décadas de uso, estas variedades han contaminado benéficamente con sus genes a los maíces criollos, por lo que se considera que los actuales son mejores que los de hace 20 y 30 años, debido a la selección que los productores hacen cada año al seleccionar la semilla para su siembra (Ortega, 1973; Vega, 1973).

Para determinar que una variedad tiene características ventajosas sobre otras y por tanto poderla recomendar para siembras comerciales a los productores, no solo se genera mediante la aplicación de un programa de mejoramiento genético, sino que se tiene que observar su comportamiento general y rendimiento en experimentos de campo por más de tres años en varias localidades representativas del área donde se desea recomendar, en comparación con las variedades en uso, para ver si las supera o no; una vez que se determina que una de ellas es ventajosa, se siembran parcelas de validación con productores, bajo sus condiciones de cultivo, para ver si la acepta; de ser así, se hace una caracterización de la nueva variedad, para registrarla en el Registro Nacional de Variedades de Plantas (RNVP), para que se libere y pueda multiplicarse para su distribución entre los productores. Las variedades Cafime y VS-201 fueron las primeras en recomendarse para siembras de temporal en la RETSACEN, con base en experimentos y parcelas de validación de temporal realizados de 1967 a 1969, en los que se probaron varias otras variedades mejoradas formadas principalmente en las regiones ecológicas de Valles Altos y el Bajío, además de las variedades criollas locales usadas como testigos (Cuadro 9.6); por sus bondades, las variedades Cafime y VS-201 se siguen incluyendo

como testigos en nuevos experimentos, para ver si alguna variedad nueva los supera.

Cuadro 9.6. Rendimiento de grano y días a antesis media de tres variedades de maíz probadas bajo temporal entre 1967 y 1969 en la RETSACEN.

Variiedad	Rendimiento Medio (kg ha⁻¹)	Días a Antesis
VS-201	1,290	66
Cafime	1,090	66
Criollos locales	920	66

Fuente: Luna *et al.* (1971).

Liberación de variedades e híbridos en 1975

En 1975 se liberaron dos variedades de polinización libre (VS-203 y VS-202) y tres híbridos (H-204, H-221 y H-222), producto de mejoramiento genético llevado a cabo en Pabellón, Aguascalientes y pruebas de temporal durante cuatro años en varias localidades de Aguascalientes, Durango y Zacatecas (Cuadro 9.7) (Gámez *et al.*, 1996). El H-204 está formado con líneas S₁ derivadas por precocidad y selección visual para resistencia a sequía, de la raza Bolita y la colecta Zac. 58; esta última es una de las colectas de maíz de la RETSACEN más precoces que se conocen (100 días a madurez fisiológica). El híbrido H-204 ha sido el maíz más rendidor en siembras de temporal en la RETSACEN; sin embargo, por lo caro de la producción de su semilla, debido a que sus progenitores producen muy poco grano, casi no se usó comercialmente.

El híbrido H-221 es producto de la cruce entre la hembra del híbrido H-220 formado antes en el Campo Experimental Bajío, de Celaya, Guanajuato, y la variedad VS-202; el H-222 proviene de la cruce entre esa misma hembra de H-220 y la variedad VS-203. Ambos se usaron comercialmente muy poco, tanto porque el productor tenía que obtener la semilla cada vez que sembraba, como porque la producción de semilla era difícil y cara porque sus progenitores eran de diferente precocidad y poco productivos, y su ciclo vegetativo era 15 días mayor que el de los maíces criollos, Cafime y VS-201. Sin embargo, Los últimos años se ha estado usando en siembras comerciales de Zacatecas la versión avanzada del híbrido H-221, conocida como VS-221, en el área de potencial productivo medio; esto, porque en la actualidad las siembras de maíz de temporal de Zacatecas tienen como principal destino el forraje, para cuya producción se requiere un ciclo de cultivo más corto que cuando el objetivo es obtener grano.

La variedad VS-203 es la mezcla de líneas S₁ derivadas de la colecta Zac. 58; es tan precoz como la colecta Zac. 58, pero su rendimiento de grano y forraje es bajo y es inconsistente en su comportamiento a través de los años y localidades; por esas razones no se llegó a usar comercialmente. La variedad VS-202 es producto de la mezcla de líneas S₁ y S₂ derivadas de la colecta Zac. 58 y de la raza Bolita; es la que se ha usado más y es también la de mejor comportamiento comparativo, por su precocidad, rendimiento y estabilidad a través de los ambientes donde se siembra.

Cuadro 9.7. Rendimiento y ciclo vegetativo de variedades de maíz que se recomiendan para siembras de temporal en la RETSACEN en las regiones de potencial medio y bajo.

Variedad	Rendimiento (t ha ⁻¹)		Ciclo vegetativo (días)	Pruebas realizadas	Región
	Grano	Rastrojo			
VS-202	1.8	3.2	105	65	BP
H-204	2.2	3.4	105	54	BP
Cafime	1.9	4.5	112	100	PM
VS-201	2.2	4.6	115	101	PM
VS-221	2.1	4.9	122	59	PM

BP = Potencial productivo bajo; PM = Potencial productivo medio.

Fuente: Luna y Gutiérrez (1998).

Época posterior a 1975

Una vez probadas las variedades mejoradas en otras zonas ecológicas, de las cuales se derivaron las recomendaciones señaladas antes, entre 1974 y 1977 se observaron en siembras de temporal en la RESTACEN 1,353 colectas de maíz de diferentes regiones ecológicas del país con condiciones de cultivo semejantes a las de la RETSACEN (Ortega y Ángeles, 1978); con las mejores colectas, tanto por precocidad, como por rendimiento y otras características agronómicas, se formaron compuestos de amplia base genética, pero, también se observaron colectas sobresalientes, y en ambas se iniciaron programas de mejoramiento genético tomando en cuenta la precocidad y la resistencia a sequía. También se aplicaron programas de mejoramiento a la variedad mejorada VS-201, por su buen comportamiento general en siembras de temporal en la RETSACEN (Luna y Gutiérrez, 1998; Zapata y Luna, 1989).

a) Variedad VS-101.- Con base a los resultados de nueve experimentos llevados a cabo de 1998 al 2002, se descubrió una nueva variedad de maíz semejante en precocidad a las variedades Cafime y VS-201, pero 7% más rendidor de grano y 16% más rendidor de rastrojo que ellos en ambientes buenos y regulares; esta variedad es la SB-101 (VS-101), derivada de la raza Bolita por el Dr. José Guevara Calderón, colaborador del INIFAP por muchos años (Cuadro 9.8). Su importancia adicional al mayor rendimiento es que los productores de estas áreas solamente disponían de dos opciones varietales de recomendación y ahora dispondrán de una más. En el Cuadro 9.9 también se puede observar que las variedades semiprecoces (110-115 días a madurez) muestran mejor rendimiento en ambientes buenos y regulares en precipitación; en cambio, los precoces (95-104 días a madurez) rinden más grano que aquellos en el ambiente de menor precipitación; aunque en rastrojo los semiprecoces rinden más, pero este será de menor calidad que el de las variedades precoces, por la mayor cantidad de grano.

Los años buenos (AB), como los regulares (AR) y malos (AM), se han observado tanto en las regiones de potencial productivo medio (Medina et al, 2003) y bajo; al primero corresponde la mayor parte del distrito de desarrollo rural Río Grande y Valparaíso, y la franja central del estado de Zacatecas pertenece al área de potencial bajo. Algunos años comienza a llover pronto en la región AM y se registra una buena precipitación en el ciclo de cultivo, por lo que en el Cuadro 9.8 se les clasifica como años buenos. Las condiciones de años buenos (AB) se han observado nueve de cada 30 años en las regiones de potencial medio y bajo; aunque cada uno con sus correspondientes precipitaciones; los años regulares se presentan en 25% de los años y los de baja precipitación en 45% de los años, sin que se observe regularidad en ello. Por estas razones, como se notó antes, las variedades semiprecoces como Cafime se deben sembrar en la región de potencial bajo cuando el temporal comienza pronto y se puede sembrar antes del 5 de julio y las precoces como VS-202 se deben preferir en siembras tardías de la región de potencial medio.

Cuadro 9.8. Rendimiento medio y días a madurez de variedades de maíz probadas en nueve ambientes de temporal del estado de Zacatecas.

Variedad	Rendimiento de grano (kg ha ⁻¹)			Rendimiento rastrojo(kg ha ⁻¹)	Días a madurez
	AB	AR	AM		
Cafime	4,260	2,410	605	2,410	112
VS-101	4,570	2,800	730	2,800	115
VS-202	3,800	2,230	870	2,325	104
V-209	3,700	2,000	735	2,010	100
Caezac 85 IIICSM	3,100	1,800	900	1,920	95

AB = años con 445 mm de precipitación media en el ciclo de cultivo (PMCC); AR = años con 355 mm PMCC; AM = años con 270 mm PMCC.

b) Otras variedades. De 1980 a 1982 se obtuvieron las generaciones avanzadas F₂ a F₄ de los híbridos H-204, H-221 y H-222 liberados en 1975 para siembras de temporal en la RETSACEN, de los cuales casi no se llegó a producir semilla ni sembrarse comercialmente por lo caro de ella; estas generaciones avanzadas se probaron en comparación con híbridos originales (F₁) entre 1983 y 1985, observando que la F₄ del H-204 disminuyó su rendimiento en 8% respecto a la F₁, del H-221 disminuyó 3.8% y del H-222, no disminuyó (Zapata y Luna, 1989). Esta información es importante porque los a veces los productores adquieren una vez la semilla híbrida y continúan sembrando semilla de su cosecha. En la mayoría de los híbridos, cuando se hace esa práctica la disminución del rendimiento es superior a 15%, además de otras desventajas como la mayor susceptibilidad a enfermedades, la irregularidad de la maduración y de la altura de la planta y de la mazorca, etc. En algunas áreas de la RETSACEN se están sembrando generaciones avanzadas del híbrido H-221.

9.4.3. Características morfofisiológicas de las variedades

La variedad V-209 se ha sometido a estudios para descubrir sus características de resistencia a sequía y se ha encontrado que su emergencia y crecimiento inicial son más rápidos que Cal. 74 del que se originó (Cuadros 9.9 y 9.10), detiene su crecimiento en la etapa vegetativa cuando falta agua y crece rápido al restablecerse la humedad del suelo (Cuadro 9.10); así mismo, muestra una menor tasa de transpiración ($15.76 \text{ g dm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) y menor densidad estomática (34 estomas por mm^2 que Cal. 74 ($16.05 \text{ g dm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ y 43 estomas por mm^2 , respectivamente) (Luna y Gutiérrez, 2000).

No obstante que las variedades de maíz de la RETSACEN son parecidas entre ellas en sus características generales, existen diferencias que las hacen distintas (Cuadro 9.11). Una característica común es que no muestran asincronía floral en siembras bajo sequía (Cortés, 1981; Castro, 1982; Gutiérrez y Luna, 1989; Luna y Gutiérrez, 1993), en comparación con lo observado por otros autores en otros maíces (Bolaños *et al.*, 1993), quienes encontraron asincronía de 10 a 35 días en siembras bajo sequía.

Cuadro 9.9. Porcentaje de emergencia de cuatro variedades de maíz sembradas bajo temporal en Calera, Zac.

Variedad	Días al 50% de antesis	Días después de la siembra				
		6	7	8	9	10
Cal 74	62	2	27	87	93	100
V-209	62	9	42	80	93	100
H-204	64	0	11	57	84	100
H-311	88	0	22	76	91	100

Fuente: Luna y Gutiérrez, 2000.

Cuadro 9.10. Área foliar (cm^2) de las dos hojas más grandes de cuatro variedades de maíz sembradas bajo temporal en Calera, Zac.

Variedad	Días después de la siembra					
	11	14	28	42	56	70
Cal 74	55a	105a	385a	569	873	870
V-209	58a	118a	302	439	966	996
H-204	53	94	384a	796	1019	1020
H-311	50	111a	364a	678	1285a	1370
DMS (0.05)	4.7	10.6	62	93	148	137

Fuente: Luna y Gutiérrez, 2000.

En el Cuadro 9.11, también se aprecia que las variedades más precoces en general muestran una menor magnitud en sus características morfológicas que las menos precoces; además, su precocidad les permite tener un menor porcentaje de

pérdida tanto por daños por sequía, como por heladas tempranas y son más eficientes en la producción de grano por unidad de materia seca producida; sin embargo, por la misma precocidad, su productividad es menor que la de una variedad menos precoz cuando las condiciones ambientales de cultivo son buenas.

Gutiérrez (1989) observó que algunas de las selecciones por sequía de la variedad VS-201 alargan el periodo a floración 2 a 3 días al cultivarse bajo sequía, respecto al cultivo bajo riego. Algunas de esas selecciones transpiraron menos que el VS-201, resistieron más tiempo a porcentaje de marchitamiento permanente, germinaron en mayor porcentaje a 15 atmósferas de potencial osmótico y formaron mayor área foliar; resultados semejantes observaron Luna y Gutiérrez (1993). También en VS-201, Peña (1981) encontró que el peso y volumen de la raíz de las plántulas era menor que el de sus derivados por selección masal y familiar; con ello, las selecciones pueden extraer más agua del suelo, evadiendo problemas de sequía.

Cuadro 9.11. Características de algunas variedades de maíz de temporal de la RETSACEN.

Característica	V a r i e d a d e s					
	V-209	VS-202	H-204	Criollo	VS-201	H-311
Días al 50% de antesis	62	63	64	65	69	88
Periodo de antesis (días)	10	13	11	20	15	18
Asincronía floral bajo sequía (días)	1	1	1	2	1	---
Altura de planta (cm)	170	170	185	170	185	260
Número de hojas	11.4	12	12.5	12	13	18
Área foliar (cm ²)	2900	3200	3500	3100	4000	7000
Índice de área foliar	1.5	1.6	1.7	1.6	1.9	---
Longitud de mazorca (cm)	13.3	12	12.8	14	12.5	16
Granos por hilera	20-28	18-28	20-30	20-27	22-30	30-40
Peso de 100 granos (g)	20-29	20-27	20-30	20-28	20-28	30-36
Peso olote/peso mazorca	0.12	0.15	0.16	0.15	0.17	0.17
Peso rastrojo/peso grano	1.2	1.3	1.4	1.4	1.4	1.9
Índice de cosecha	0.42	0.38	0.35	0.3	0.35	0.33
Riesgo de pérdida por sequía (%)	8	10	10	15	25	100

Fuente: Luna y Gutiérrez (2000).

En estudios de interacción genotipo ambiente (Martín del Campo, 1980; Lechuga, 1997) y parámetros de estabilidad (Martín del Campo *et al*, 1979; Peña y Cortés, 1988; Campos, 1994), se ha concluido que los maíces más tardíos, como H-221 de 125 días a madurez son más estables en su productividad en siembras de temporal muy tempranas en la RETSACEN (antes del 25 de junio), los de ciclo

intermedio como Cafime y VS-201 en siembras anteriores al 5 de julio y las más precoces como VS-202 y V-209 en las siembras tardías, del 5 al 15 de julio. Las primeras se verían afectadas por falta de agua al final de su ciclo vegetativo al sembrarse tardíamente y las precoces se verían limitadas en su rendimiento en siembras tempranas, en comparación con las tardías e intermedias, ante un buen temporal.

9.4.4. Rendimiento de grano obtenido en parcelas de validación y comerciales con algunas variedades

En el Cuadro 9.12 se presentan los promedios de rendimientos de grano obtenidos en siembras de maíz de temporal en diversas localidades del estado de Zacatecas, por diferentes productores y años. Los resultados de Sombrerete y Valparaíso corresponden a siembras con las variedades VS-201 y Cafime y el resto a VS-202 y V-209. En algunos casos no se obtuvo rendimiento por efecto de sequía. Es importante enfatizar que en promedio los materiales obtenidos del proceso de mejoramiento presentan rendimientos un 70% arriba de los criollos regionales en las mismas condiciones, además es clara la tendencia a tener un mayor impacto en áreas de menor potencial productivo (Sombrerete).

Cuadro 9.12. Rendimientos de maíz de temporal con tecnología recomendada obtenida por productores en seis municipios del Estado. Entre paréntesis se anota el número de parcelas establecidas.

	RENDIMIENTOS (kg/ha)		%
	MEJORADA	TRADICIONAL	
SOMBRERETE (4)	2550	1913	33
VALPARAÍSO (4)	1975	1055	87
MORELOS (5)	1600	880	82
OJOCALIENTE (5)	966	496	95
CALERA (6)	1005	562	79
GUADALUPE (1)	1590	600	165
PROMEDIOS	1542	909	70

9.5. CONCLUSIONES

La sequía se considera como una condición natural en algunas regiones del estado de Zacatecas y es claro que se requiere convivir con esta condición, en lugar de modificarla; particularmente por la importancia que tiene la superficie estatal dedicada a la agricultura de temporal y los agostaderos. En este capítulo se definieron una serie de estrategias de mitigación de la sequía: conversión de cultivos de temporal, programa de reconversión productiva en un ejido y el mejoramiento genético con resistencia a sequía en maíz.

Para la primera estrategia, en el año 2002, el programa estatal de conversión de cultivos consistió en la siembra de avena forrajera, en áreas de bajo potencial productivo para frijol, en una superficie de alrededor de 19 mil hectáreas;

particularmente, el programa se concentró en los distritos con mayores siembras de frijol. En el ciclo P-V 2003 el programa de conversión de cultivos llegó a casi 56 mil hectáreas con 9,850 productores participantes; dando un promedio de 5.7 hectáreas por productor. Para el año 2004, se pretende incluir en el programa alrededor de 130 mil hectáreas e incorporar especies como avena forrajera, cebada maltera, maíz y pastos.

En cuanto a la segunda estrategia, la superficie agrícola dentro del ejido Pánuco, susceptible de ser reconvertida hacia la actividad pecuaria, presentó diferentes grados de falta de aptitud; el total de la superficie identificada para reconvertir es de 753 hectáreas. La superficie de agostadero que requiere mayor atención en programas de mejoramiento de la condición, debida a su susceptibilidad a la erosión, es de 208 hectáreas. El proyecto para el ejido Pánuco contempla la conversión de cultivos y reconversión productiva del área agrícola de baja aptitud; estas acciones contemplan la siembra de especies alternas y el establecimiento de nopal, arbustivas y pastos. De igual forma el descanso y exclusión, además de un sistema de apacentamiento rotacional, son opciones tecnológicas que serán sugeridas para el agostadero de Pánuco.

Finalmente, en lo que respecta a variedades con resistencia a sequía, se puede mencionar que el Cafime está siendo purificado y que en los últimos años esta variedad se ha sembrado en el Estado hasta en 5 mil hectáreas.

9.6 LITERATURA CITADA

Bolaños, J., G.O. Edmeades, and L. Martínez. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Responses in drought-adaptive physiological and morphological traits. *Field Crops Res.* 31:269-286.

Campos C., A. 1994. Estabilidad de rendimiento de once variedades de maíz bajo temporal en el estado de Aguascalientes. Tesis Profesional, UACH. Chapingo, Edo. de Méx. 72 p.

Castro R., V.M. 1982. Relative drought resistance among selections of mexican highland maize. M.Sc. Thesis, Univ. of Guelph. Ontario, Canada. 85 p.

Chen, J. and Liu, C. 1999. Coupling of water and land resources and its application in regionalization. *Journal of Environmental Sciences* 11(1): 13-17.

Cochrane, T. A. and Flanagan, D. C. 1999. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models. *Journal of Soil & Water Conservation* 54 (4): 678685.

Comisión de Estudios para el Territorio Nacional (CETENAL). 1968. Sistemas de clasificación de la capacidad agrológica de la tierra. Gobierno de México.

Comisión de Estudios para el Territorio Nacional (CETENAL). 1973. Sistemas de clasificación de la tierra para uso potencial. Secretaría de la Presidencia. Boletín especial.

Comisión Técnico Consultiva para la Condición de Agostaderos (COTECOCA). 1980. Determinación de coeficientes de agostadero, Zacatecas y Aguascalientes. 210-218.

Cortés N., J.R. 1981. Selección recurrente para tolerancia a sequía en el compuesto de maíz Calera 74. Tesis M.C., UAAAN. Saltillo, Coah. 78 p.

De Hoogh, P. 1999. The peach market in Mexico. Producing under risk in Jerez, Zacatecas. MSc. Thesis. Wageningen Agricultural University. Netherlands.

DeMers MN. 2000. Fundamentals of Geographic Information Systems. 2nd Ed. New York, USA: John Wiley and Sons.

De Miranda, E.; A.J. Dorado; Guimaraes, M. et al. 1995. Impacto ambiental y sostenibilidad agrícola: la contribución de los sistemas de información geográficas. RIMISP CIID, Santiago de Chile.

Diario Oficial de la Federación. 2002. Lineamientos y mecanismo específico de operación del subprograma de apoyos a la conversión del cultivo de frijol, del ciclo primavera verano 2002, por el cultivo de avena forrajera, del estado de Zacatecas. Gobierno de la República. 27 de septiembre de 2002: 19-26.

Echavarría Ch. F.G., G. Medina G., R. Gutiérrez L., y A. Serna P. 2004. Identificación de áreas susceptibles de reconversión de suelos agrícolas hacia agostadero y su conservación en el ejido Pánuco, Zacatecas. Técnica Pecuaria en México. 42(1): 39-53.

Gámez V.A., M.A. Perches, H.H. Ángeles A., C. Díaz H., H. Ramírez V., A. Alejo J., y A. D. Terrón I. 1996. Híbridos y variedades de maíz liberados por el INIFAP hasta 1996. Publicación Especial N° 16. SAGAR-INIFAP. P. 47.

Gotway CA, Ferguson RB, Hergert GW and Peterson TA. 1996. Comparison of kriging and inverse methods for mapping soil parameters. Soil Sci Soc Am 60:1237-1247.

Gutiérrez S., J.R. y M. Luna F. 1989. Selecciones para resistencia a sequía en un compuesto de maíz en Zacatecas. Rev. Fitotec. Mex. 12:94-104.

Hardin, B. 1999. Remote Sensing Keeps an Eye on Natural Resources. Agricultural Research 47(7): 8-11.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2001. Anuario Estadístico del Estado de Zacatecas. 487 pp.

Lal, H., G. Hoogenboom, J-P. Calixte, J. W. Jones and F.H. Beinroth. 1993. Using crop simulation models and GIS for regional productivity analysis. Transactions of the ASAE 36: 175-184.

Lechuga A., M. 1997. Comportamiento de genotipos de maíz (*Zea mays* L.) en diferentes ambientes de temporal del Altiplano de Zacatecas. Tesis Profesional, Facultad de Agronomía, UAZ. Zacatecas, Zac. 77 p.

Liebhold AM, Rossi RE and Kemp WP. 1993. Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. Ann Rev Entomol 38:303-327.

Luna F., M. 1993. Mejoramiento genético de maíz para condiciones adversas. In: Simposium Internacional "El Maíz en la Década de los 90". Memorias in extenso. Zapopan Jal. México. P 161-170.

Luna F., M., H.H. Ángeles A. y J.J. Moncada de la F. 1971. Tres años de experimentación con variedades e híbridos de maíz de riego y temporal en el estado de Durango. Informe de Investigación. CIANE-INIA-SAG. Matamoros, Coah. 25 p.

Luna F. M. y J.R. Gutiérrez S. 1993. Efectos de la selección familiar sobre la floración y componentes de rendimiento en maíz. Rev. Fitotec. Mex. 16:151-160.

Luna F., M. y J.R. Gutiérrez S. 1998. Mejoramiento genético de maíz de temporal en la región del centro norte de México. Rev. Fitotec. Mex 21:147-158.

Luna F., M. y J.R. Gutiérrez S. 2000. Investigación fisiotécnica de maíz de temporal en la región alta del norte de México. Rev. Fitotec. Mex. 23:195-210.

Lyons-Johnson, D. 1998. GPS helps put manure where it counts. Agricultural Research 46 (6): 16-17.

Martín del Campo V., S. 1980. Análisis de medias y componentes de varianza de tres grupos de poblaciones de maíz del norte centro de México. Tesis M.C., C.P. Chapingo, Edo. de Méx.

Martín del Campo V., S., V.M. Castro R. y J.R. Gutiérrez S. 1979. Parámetros de estabilidad para cuatro variedades de maíz en siete ambientes de temporal en el estado de Durango. Rev. Fitotecnia 3:3-12.

Medina G. G.; A. Rumayor-Rodríguez; B. Cabañas C.; M. Luna F.; A. Ruiz C.; C. Gallegos V.; J. Madero T.; R. Gutiérrez S.; S. Rubio D.; A. Bravo L. 2003. Potencial Productivo de Especies Agrícolas en el Estado de Zacatecas. INIFAP. CIRNOC. Campo Experimental Zacatecas. Libro Técnico 2. 147 p.

Medina G.G., Ruiz C.J.A., Martínez P.R.A. y Ortiz V.M. 1997. Metodología para la determinación del potencial productivo de especies vegetales. *Agric. Téc. Méx.* 23(1):69-90.

Moncada de la F. J.J. 1957. Determinación de la precocidad y resistencia a la sequía en variedades seleccionadas de maíz. Tesis Profesional, ITESM. Monterrey, N.L. 60 p.

Mrazek L. 1999. Growing Agriculture Statistics on the Web: A Primer. *Searcher* 7(10): 51-54.

Ortega P., R.A. y H.H. Ángeles A. 1978. Maíz. En: Recursos genéticos disponibles a México. T. Cervantes (ed.). SOMEFI. Chapingo, Edo. de Méx.

Ortega P., R.A. 1973. Variación de maíz y cambios socioeconómicos en Chiapas, México 1946-1971. Tesis M.C., C.P. Chapingo, Edo. de Méx.

Palacios de la Rosa G. 1959. Variedades e híbridos de maíz "latentes" y tolerantes a la sequía y a las heladas. *Rev. México Agrícola* 107:38-39.

Peña R., A. 1981. Comportamiento de maíces mejorados mediante diversas metodologías y criterios de selección bajo condiciones de temporal. Tesis Profesional, U de G. Guadalajara, Jal. 77 p.

Peña R., A. y Cortés N. J.R. 1988. Efecto de la precipitación pluvial en tres etapas fenológicas del maíz en Los Llanos de Durango. *Rev. Fitotec. Mex.* 11:18-24.

Richardson, M.S. and Gatti, R.C. 1999. Prioritizing wetland restoration activity within a Wisconsin watershed using GIS modeling. *Journal of Soil & Water Conservation* 54 (3): 537-542.

Rumayor Rodríguez A.; Zegbe, J.A. and Medina G. G. 1998. Use of a Geographical Information System (GIS) to describe suitable production areas for peach. *Acta Horticulturae* 465: 549-556.

Serna P. A. y Echavarría, Ch. F. G. 2002. Caracterización hidrológica de un agostadero comunal excluido al pastoreo en Zacatecas, México. *Técnica Pecuaria en México.* 40(1): 37-53.

Vega Z., G. 1973. Estudio de la infiltración genética de los maíces mejorados sobre los criollos de temporal de los estados de México, Puebla y Tlaxcala. Tesis M.C., C.P. Chapingo, Edo. de Méx.

Wischmeier WH and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. USDA, Agric., Handbook 537, Washington, DC. USA.

Zapata A., R.J. y M. Luna F. 1989. Investigaciones de maíz en el CIANOC: Resultados y avances hasta 1985. Publicación Especial núm. 2. CIANOC-INIA-SARH. Calera de V.R., Zac. 78 p.

10. CRITERIOS Y PRINCIPIOS METODOLÓGICOS A CONSIDERAR EN LA DISTRIBUCIÓN DEL DÉFICIT DE AGUA

Dr. Israel Velasco Velasco
Especialista en Hidráulica
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
ivelasco@tlaloc.imta.mx

10. CRITERIOS Y PRINCIPIOS METODOLÓGICOS A CONSIDERAR EN LA DISTRIBUCIÓN DEL DÉFICIT DE AGUA

Dr. Israel Velasco Velasco

10.1. INTRODUCCIÓN

La tarea de asignar volúmenes de agua a los diversos sectores de uso no es una tarea fácil en condiciones normales de disponibilidad, y esta complejidad aumenta considerablemente si existe escasez.

La política hidráulica, como tradicionalmente se ha entendido, trata de responder al problema de la escasez de agua en general, y particularmente en condiciones de escasez, con intentos de incrementar la disponibilidad del recurso para responder a la demanda. No obstante, el concepto puede resultar confuso, ya que usualmente sólo se asocia al proceso de incrementar la oferta de agua. En vez de esto, cada vez adquiere mayor significado y dimensión el concepto “política de gestión de aguas” (Sumpsi *et al.*, 1998), o bien “gestión integral de manejo del agua” (Martínez, 2001), entendidos ambos como aquellas actuaciones y medidas que tienen por objeto corregir los desequilibrios entre la oferta y la demanda de los recursos hídricos, tanto en los aspectos cuantitativos como cualitativos.

Aunque aplicable a la escasez crónica y progresiva del agua, los siguientes principios fundamentales para una gestión moderna del agua son los siguientes (Donzier, 2000, citado por Martínez, 2001):

- Tener una visión global e integrada del recurso.
- Clarificar las responsabilidades.
- Organizar adecuadamente a escala de las grandes cuencas hidrográficas y de los acuíferos.
- Participación directa y activa de las diferentes administraciones y colectividades territoriales, a través de consejos y parlamentos del agua.
- Luchar contra el despilfarro y prevenir la contaminación permanente o accidental.
- Aplicar el principio “usuario contaminador - usuario pagador.”
- Crear nuevas capacidades de formación de recursos humanos.
- Mejorar el conocimiento sobre el problema.

Las tensiones y conflictos inherentes a la falta temporal de agua son inevitables. Por ello, el proceso de distribución del déficit hídrico es en general arduo y complicado, pues dadas las características de escasez, no es posible suministrar a todos los sectores toda el agua que requieren. Es necesario un persuasivo procedimiento, en el que los responsables institucionales y sectoriales del manejo del recurso actúen con toda cautela y con espíritu conciliador.

10.2. DISTRIBUCIÓN DEL DÉFICIT

Evidentemente, el primer paso es saber con cuánta agua se cuenta y cuánta se necesita. El proceso básico de la asignación y distribución del agua disponible y del déficit debe ser regido por el principio de que es la demanda la que debe adaptarse a la oferta disponible, y no a la inversa. Bajo este enfoque, la planeación debiera hacerse con los valores mínimos de la oferta, ya sea en volúmenes almacenados o en aportaciones registradas y/o esperadas (Sumpsi *et al.*, 1998). Ello conlleva cierta garantía de que al menos esos volúmenes serán entregados.

Cuando no se tiene el agua suficiente para satisfacer todos los requerimientos de los diversos sectores usuarios, entonces la demanda no satisfecha, lo que es el déficit, tiene que distribuirse entre los afectados.

Dados los diversos niveles de administración, uso y planeación del agua, en consecuencia también debe haber varios niveles de asignación de volúmenes y déficit. El reparto sectorial del agua en una cuenca es tarea de la administración institucional que aplica criterios de carácter básicamente político; entre grupos de usuarios de un mismo sector, un eficiente mecanismo de asignación puede ser el mercado del agua. Así, visto a gran escala, a nivel de cuenca o región hidrológica, debe ser la CNA la instancia que defina la disponibilidad a corto y mediano plazo; razonablemente, la asignación del déficit debiera contemplar un periodo no mayor a un año, bajo el supuesto de que la insuficiencia es temporal, aunque simultáneamente debe tomar las provisiones de que la escasez se prolongue por varios periodos anuales consecutivos.

Con base en la información histórica disponible en CNA (en sus diferentes niveles: nacional, regional, estatal), así como en lo propio de que dispongan los gobiernos estatales y las Comisiones Estatales del Agua (cuando existan), se podrá formular un esquema de la demanda total por sector, tanto en tiempo como en espacio, cuyo contraste con la oferta dará las primeras pautas a seguir en la asignación, y permitirá dimensionar el déficit, con lo cual se puede hacer un primer balance de repartición del agua.

Desde luego, la prioridad sectorial debe mantenerse actualizada, y en ello debe considerarse la tendencia del desarrollo demográfico con sus respectivos aumentos en la demanda para usos urbanos municipales y doméstico en general, sector que, como se ha discutido, por Ley tiene la máxima prioridad. Para este uso, sí debe preverse que se disponga de volúmenes mínimos en los periodos subsecuentes, protegerlos y preservarlos para tal fin.

La planeación hidráulica de largo plazo, como es sabido, usualmente contempla horizontes de 10, 20 o más años, y está basada en tendencias en el consumo, usualmente crecientes, mientras que la disponibilidad en el mejor de los casos se mantiene y cada vez con mayor frecuencia, muestra una tendencia a disminuir ligeramente o a tener más variación, quizá debido a los cambios naturales y a la influencia del hombre (Velasco y Collado, 1998; Martínez, 2001).

La realidad de este hecho es que no se contemplan con detalle los casos extremos, inundaciones y sequías, y cuando se presentan, por ende no se dispone de lineamientos, reglamentos o normas sobre las cuales basar la actuación de autoridades o usuarios, o bien son insuficientes; no obstante, debe considerarse que estos eventos naturales no son raros y su persistencia constituye serios obstáculos que afectan sensiblemente a los planes basados en promedios y tendencias.

Esta planeación de largo plazo, aún hecha con las mejores herramientas e información, tiene un mayor grado de incertidumbre, porque los cambios esperados o previsibles pueden ser más drásticos, con lo que se alteran las expectativas; por esto sería más conveniente hacer planes de mediano plazo, por ejemplo a cinco años (Sumpsi *et al.*, 1998; Krinner, 1994), de manera tal que al fin de este periodo se puedan hacer revisiones y actualizaciones más acordes con la realidad y de mayor impacto.

Desde esta óptica, éste nivel de gestión y administración del recurso con responsabilidad de CNA básicamente es una *administración burocrática* (Palerm Viqueira, 2001) en la cual también participan los gobiernos estatales. Corresponde entonces a estas instancias definir la distribución del déficit a nivel sector, para lo cual deberá considerarse el entorno económico-social-ambiental de la cuenca o región. Esto implica conocer a detalle las demandas sectoriales, la vulnerabilidad de cada sector, la elasticidad de esa demanda, y las posibilidades alternas de que cada sector pueda sostener o superar el estado de insuficiencia de agua sin que los impactos negativos sean de severa crisis. La importancia o peso específico de cada sector dentro de la estabilidad social regional (vía empleos o jornales generados, por ejemplo) es un factor primordial que debe tenerse en cuenta al hacer las asignaciones.

Además, deberá tenerse en cuenta la *resiliencia* o capacidad de recuperación del sector ante situaciones de déficit: es importante balancear si los daños aunque sean moderados tienen un largo periodo de recuperación, o bien pueden ser más agudos pero de más corto tiempo de volver a las condiciones normales, y qué tan importantes son estos efectos en el entorno local y regional.

En el proceso de definir y enjuiciar una política de gestión del agua, algunos de los criterios básicos a tener presentes son (Sumpsi *et al.*, 1998):

- *Flexibilidad*: capacidad de la política de gestión para modificar el uso del agua con arreglo a los cambios climáticos, demográficos y económicos.
- *Seguridad de tenencia entre los titulares de derechos de uso*: cuanto mayor la solidez jurídica en el ejercicio y disfrute del derecho mayor será el cuidado con que se mantiene el equipamiento de su titular para almacenar, distribuir o aplicar el agua.

- *Repercusión a los titulares de derechos de tarifas iguales*, o al menos parecidas, al costo real de oportunidad del agua; esto induce a los usuarios a emplear el agua con mayor eficiencia al tener en cuenta su costo social.
- *Predictibilidad en los resultados de la política de gestión*: si una política es funcional, con resultados previsibles y cercanos a lo esperado, es conveniente mantenerla, aunque haya aparentes signos de obsolescencia.
- *Percepción de equidad*: la aceptación de una política de gestión está en razón directa a la percepción en términos de la justeza económica que sobre ella tengan los diversos agentes participantes.
- *Capacidad de reflejar los valores sociales o públicos*: los que cada sociedad o comunidad construye en torno a sus recursos hídricos, y que el ignorarlos o deformarlos puede provocar un rechazo a la política de gestión que se desee implantar.

10.3. LA ASIGNACIÓN DEL RECURSO POR SECTOR

10.3.1 Sector doméstico-urbano

Como se ha recalcado, el sector doméstico-urbano es el de máxima prioridad. Los demás usos tendrán una prioridad acorde a su importancia relativa, en la que se reflejarán las condiciones socio-económicas, el impacto de corto, mediano y largo plazos, el daño ambiental y la fragilidad de los ecosistemas, y las posibilidades de resistir y superar la emergencia por falta de agua. En particular, debe tenerse presente que la sequía en muchos casos ocasiona la movilización de la población en busca de condiciones que les permita sostener o mejorar su nivel de vida. Frecuentemente, en México estos cambios se hacen hacia las grandes ciudades o hacia las fronteras con USA, lo cual no implica la solución del problema, sino su traslado hacia otros lugares, y en muchos casos con otros inconvenientes adicionales que requieren atención por parte de las autoridades y que tienen un elevado costo social y económico: vivienda, servicios, alimentación, educación, etc.

Por estas razones, un objetivo adicional de la asignación, no siempre visto como tal o en toda su dimensión, debería ser propiciar que la población permanezca arraigada en su lugar de origen. Ello implica la necesidad de que el déficit sectorial sea tal que el agua disponible y asignada conserve la productividad mínima que permita mantener el empleo y la actividad económica de tal suerte que el agua tenga el valor social y económico para este fin.

De esta manera, es el nivel gubernamental el responsable de asignar tanto el agua disponible como el déficit a nivel de sector. En este proceso, además del carácter eminentemente técnico, también debe contemplarse al *carácter social* que el agua adquiere en estos casos, y que se reflejan en lograr la equidad, justicia social y eficiencia, vista ésta última como el conjunto de indicadores del buen uso del recurso (Collado, 1998).

Aunque CNA es la cabeza de sector, en la asignación debe tenerse presente la opinión y participación de otras dependencias, federales y estatales, y conciliar los intereses para encontrar el punto de equilibrio entre ellos, especialmente cuando la cuenca es compleja y existen múltiples usuarios ampliamente distribuidos espacialmente, como es el caso de la cuenca del río Conchos; más todavía, este aspecto adquiere especial importancia cuando la cuenca es o forma parte de un complejo fisiográfico internacional, como lo es la cuenca del río Bravo, que están sujetos a tratados internacionales.

El proceso de análisis y asignación debe presidirlo CNA, que también será la instancia que aporte la información hidrológica, hidrométrica, climatológica y de estadística sectorial necesaria para apoyar los análisis técnicos. Presumiblemente, con anticipación CNA debería elaborar simulaciones que condujeran a una gama de alternativas, en las que se refleje el *qué pasaría si*. Prever de esta manera las posibilidades lleva implícito el manejo del riesgo, y por ende también la base para el diseño y actuación de las medidas pertinentes en caso de que la situación empeore.

Algunas de las dependencias federales que deben participar en tal proceso, a través de sus representantes autorizados son SAGARPA, SEMARNAT, Secretaría de Economía, entre otras; por parte de los gobiernos estatales, las respectivas Secretarías de Desarrollo Agropecuario o similares serían las indicadas para este propósito. En caso de que la situación lo amerite por extrema escasez, la Secretarías de Gobernación y de Hacienda (a través del FONDEN) también deberá intervenir.

Los representantes de los sectores usuarios deberán también participar en el proceso, aportando criterios y elementos que permitan encontrar la mejor solución al problema, con una plena conciencia de que existe un déficit que debe ser absorbido (Castillo, 2001). De esta manera, en cierta forma definir la distribución del déficit se convierte en una negociación entre la oferta y la demanda a nivel de fuentes de abastecimiento, de disponibilidad total, y lo que se busca es un punto de equilibrio en el que se minimicen los daños y se obtenga el máximo beneficio económico, técnico, ambiental y social del agua.

Un aspecto importante del proceso es que los representantes sectoriales del agua tengan en mente que en condiciones de escasez, una parte de la demanda no satisfecha les toca absorber a cada uno, y que por tanto deben tener ánimo para ceder volúmenes que en condiciones normales tendrían a su disposición sin restricciones mayores.

El conjunto de funcionarios de las diversas dependencias y los representantes de los sectores, además de algunos otros miembros forman lo que se ha denominado el Grupo Técnico Directivo (GTD), el cual debe tener capacidad, autoridad y poder de decisión y ejecución para llevar adelante sus acuerdos.

10.3.2 Sector agrícola

Como es sabido, el sector agrícola es el que usualmente requiere mayores volúmenes de agua, y en el que también el recurso tiene su más bajo valor, a veces casi simbólico, y por ello con frecuencia usado con bajas eficiencias. Estos aspectos tienden a mejorar, pero el sector sigue siendo el menos eficiente, y no necesariamente porque sea malo, sino porque sus características así lo hacen, por el uso consuntivo del agua. Respecto a los sistemas tradicionales de riego superficial por gravedad, los modernos sistemas de riego mejoran en mucho la eficiencia técnica, pero son costosos tanto en su implantación como en su operación, y de todos modos siempre hay una pérdida de agua; no obstante, en estos casos el agua alcanza una mayor valoración como bien económico, lo que obliga a los usuarios a cuidarla más.

Por estas razones, cuando hay problemas de escasez, lo usual es que sea el sector agrícola el que primero sufre las consecuencias; diríase que es el primer sector al que se puede recortar su asignación. Esto lleva a restricciones que se traducen en disminución de superficies, de láminas o de ambos, a cambios de cultivos por los que requieran menor cantidad de agua o de menor ciclo vegetativo, o los que tengan mayor valor comercial, o los que tengan más beneficio social, como la generación de empleos directos e indirectos. El Comité Hidráulico de cada zona de riego, como máximo órgano de gestión del sistema, debe acatar la proporción de déficit que haya resultado de este balance y con ello proceder a sus programas de uso del agua.

De manera semejante, los demás sectores también tendrán una reducción en sus asignaciones de volúmenes, absorbiendo una parte del déficit, que como se ha argumentado, deberá estar de acuerdo a su vulnerabilidad, a la elasticidad en su demanda y a las opciones o alternativas que tenga para cumplir con sus metas.

10.3.3 Sector industrial

Así, el sector industrial, quizá el menos afectado en estas condiciones, tendrá que buscar opciones novedosas que le permitan mantener sus estándares de producción y calidad. El reciclado, el reuso y alternativas semejantes que incrementen la eficiencia de uso del agua serán casi obligadas para resistir los embates del fenómeno de la sequía. En este sector, dependiendo de que haga un uso consuntivo del agua o sólo sea para procesos que no la consuman (enfriamiento, generación de energía, por ejemplo), las opciones aumentan y con ello las posibilidades de mitigar el impacto también.

Una ventaja relativa de este sector es que, proporcionalmente, es el que usa menos agua y en gran parte por lo general proviene del subsuelo, de manera que tiene mayor garantía de su disponibilidad, aunque también es usual que su costo sea mayor. En este sentido, es posible que la industria incluso hasta se vea beneficiada, pues tiene capacidad para obtener más agua vía compra de derechos o por el mercado del agua, en forma temporal, ya que la inversión en instalaciones, maquinaria, equipo, y los compromisos de producción sirven como

estímulo para hacer lo que sea necesario con tal de tener continuidad. Esto ha sucedido, por ejemplo, en la Región Lagunera, donde a pesar de la cada vez más frecuente falta de agua, que ha minimizado a la agricultura, la industria ha prosperado significativamente, en especial la industria maquiladora, con altos índices de productividad y eficiencia.

La agroindustria, de lácteos, conservas, ganadería de alto rendimiento, también ha tenido fuertes repuntes aun en casos de escasez de agua, porque el alto valor agregado de sus productos permite hacerse de más volúmenes y usarlos con mayor eficiencia.

10.3.4 Sector ganadero

El sector ganadero, en especial la ganadería extensiva, también se ve fuertemente afectada por la falta de agua, ya que al disminuir las praderas naturales, surgen problemas de pérdida de peso de los animales, muerte por sed o deshidratación y en general se tienen fuertes mermas en cantidad y calidad; la afectación puede ser de tal magnitud, como ha ocurrido en Chihuahua y en el norte de México en general, que las pérdidas son cuantiosas y se requerirá de largo tiempo y grandes inversiones para lograr la recuperación (Castillo, 2001). Éste es un sector que debería tener más prioridad, digamos después del doméstico urbano, por el riesgo de pérdida que implica. Proveer al ganado del agua y alimento mínimo necesario para su supervivencia, por ejemplo en condiciones de estabulación o de concentración en áreas compactas significa que parte de los volúmenes castigados al sector agrícola se destinen a salvar al ganadero. Para que esto tenga efectos positivos, aún en condiciones normales de disponibilidad, la carga de ganado debe ser acorde a la capacidad de sostenimiento; es decir, el sector no puede crecer indiscriminadamente, para que en situaciones de crisis sobreviva a costa de otros sectores.

Otra opción de ayuda en estos casos es la exportación hacia áreas menos afectadas de los animales en pié, o bien directamente a los mercados consumidores, antes de que las pérdidas sean mayúsculas. En cualquier caso, el sector ganadero también debe absorber su parte del déficit y propiciar los cambios y estrategias para su continuidad.

10.3.5 Sector ambiental

Como se ha mencionado, el sector ambiental es probablemente y casi en la mayoría de los casos, el que resulta más afectado, ya que según aumente la gravedad de la insuficiencia, puede llegar a tener asignación nula y absorber el máximo déficit, antes que los demás sectores. Esto es comprensible pero no necesariamente aceptable, pues preservar las condiciones naturales de flora y fauna tiene su importancia en términos ecológicos y paisajísticos. Si estos factores se alteran más allá de cierto nivel, se corre el riesgo de la desaparición de especies y de cambios drásticos e irreversibles en el entorno natural. Para ello, la observancia y aplicación de las leyes vigentes será de especial importancia, y en ello los grupos ecológicos y las asociaciones no gubernamentales deben jugar un

papel preponderante y hacer valer el derecho que asiste al sector ambiental como medio y sostén de todo el entorno.

Así, esta primera parte del proceso de distribución del déficit involucra la participación de instituciones y representantes sectoriales de primer nivel. Por tanto, la asignación de volúmenes se hace *en bloque*, es decir, en cantidades volumétricas tales que su distribución en el tiempo, de las fuentes de abastecimiento, esté plasmada en un programa de extracciones, tanto mejor en cuanto sean cantidades óptimas, y así se tendrá una política de operación del embalse o acuífero o ambos, según sea el caso. Como se ha mencionado, no debe perderse de vista al futuro de mediano plazo, ya que el riesgo de que la insuficiencia o carencia real se prolongue puede ser elevado.

Se insiste en que estas asignaciones de volúmenes disponibles y de déficit se hagan considerando las necesidades y disponibilidades de toda la cuenca, para obtener un balance más realista y con ello que las posibilidades de mitigación sean más factibles.

10.4. AGUAS SUBTERRÁNEAS

Esto es especialmente importante de tener presente, si, como indican ciertos estudios y autores (Martínez, 2001) por ejemplo, las evidencias en las tendencias hidrológicas y ambientales más actuales, revelan que en un futuro cercano, México podría enfrentar un estrés hídrico muy alto en las cuencas de los ríos Colorado, Bravo y Lerma-Balsas, así como en la Península de Baja California, el Valle de México y en la Región Lagunera; tan alarmante es este pronóstico que se estima que las condiciones podrían ser semejantes a las imperantes últimamente en el norte de África y en el Medio Oriente. El estrés hídrico se estima como la relación entre las extracciones y la capacidad total de las fuentes renovables en una cuenca determinada, y es muy alto si se usa el 80% de los recursos disponibles, lo cual aumenta significativamente la vulnerabilidad del área y pone en serio riesgo de colapso la infraestructura física y la estabilidad social y económica.

Aún cuando es un hecho que en situaciones de estrés, disponer de agua subterránea significa un valioso alivio -“el agua subterránea continúa siendo la más efectiva respuesta unitaria contra la sequía” (Brumbaugh *et al.*, 1994, citado por Sumpsi *et al.*, 1998)-, no debe perderse de vista que los acuíferos son una fuente *no renovable* a corto plazo, y que su uso masivo conduce inexorablemente a situaciones de mayor riesgo. Con frecuencia, aunque momentáneamente esta agua es la solución al problema, una realidad dolorosamente triste a un futuro inmediato o medio, es que el uso de las aguas subterráneas sin la suficiente planeación sólo conduce a agravar los problemas de disponibilidad, tanto por cantidad como por costo y calidad. (Moore *et al.*, 1995). Las técnicas de recarga artificial, aunque bien estudiadas y perfectamente viables, en general se vuelven tan lejanas y poco factibles, que los acuíferos están sufriendo un progresivo deterioro al que no se avizoran remedios prácticos que les devuelvan sus características de origen, y parecen estar condenados a su degradación total.

Las experiencias y estudios en México en este tema muestran la capacidad técnica para lograr mitigar el deterioro del agua subterránea vía la recarga artificial (IMTA, 1997; Gutiérrez, 1996), pero la realidad de los hechos es que poco se ha logrado en este sentido, principalmente en los acuíferos de las zonas áridas y semiáridas, donde los niveles muestran un franco y acelerado descenso, que la recarga artificial poco ha podido contener (IMTA, 2000; IMTA, 2000a).

Efectivamente, en zonas áridas y semiáridas, como el desierto chihuahuense, con una carestía crónica de agua (que es diferente a la sequía), los acuíferos se convierten en una importante fuente de agua, y a veces en la única. Por sus características, los acuíferos son una fuente de agua “segura”, en el sentido de que, a corto plazo, están menos sujetos a las variaciones que sufren las aguas superficiales.

Estos acuíferos, como todos los de zonas similares, tienen un enorme tiempo de formación, usualmente de siglos, debido a la tasa de agua disponible para alimentarlos, proveniente de la lluvia que es escasa, y en gran medida, su formación no es *in situ*, sino que provienen del flujo subterráneo del agua que llovió y se infiltró en otras partes, generalmente en las zonas altas y montañosas. Las precipitaciones, en un ambiente tan “sediento” tienden a evaporarse y regresar a la atmósfera rápidamente, y lo que penetra en el suelo se somete a tales fuerzas de capilaridad en las capas superficiales que a fin de cuentas, es sólo una mínima proporción lo que queda disponible para llegar a las capas profundas donde está el acuífero (Gutiérrez, 1996). Por otro lado, y dependiendo de las características del subsuelo, las distancias verticales a recorrer son tales (en acuíferos no explotados en los mejores casos no menores de 10 metros; en los más explotados, superiores a 100 metros) y las velocidades de movimiento del agua son tan lentas que toma mucho tiempo su flujo en distancias relativamente pequeñas; aún tratándose de flujo vertical hacia abajo, los intersticios entre partículas del suelo hacen que domine el flujo en medios porosos, de propiedades diferentes a aquel flujo sólo sujeto a la gravedad.

Más aún, cuando las lluvias llegan a ser superiores a lo normal, a pesar de la sequedad del suelo, éste es incapaz de retener el agua, y en las tormentas que se llegan a presentar, en cuestión de minutos se forman ríos y arroyos que fluyen rápidamente, sin dar tiempo a la filtración profunda; todavía más, se vuelven destructivas por la erosión que causan y el arrastre de sedimentos que perjudica las obras y asentamientos aguas abajo, amén de su peligrosidad por los elevados gastos instantáneos y la impreparación de la población para enfrentarlos, donde influyen tanto las medidas estructurales (puentes, alcantarillas, desagües, bordos, etcétera) como las no estructurales (planes de contingencia para actuar con oportunidad). Casos extremos y no raros son los ocurridos con el huracán *Juliette* en Baja California Sur y Sonora, donde a pesar de la aridez de la región, las intensas lluvias ocasionan fuertes daños de todo tipo; obviamente también tienen su lado bueno, como es generar aportaciones a los embalses, pero lo más espectacular y momentáneo son los graves, cuantiosos y costosos daños.

Todo esto remarca la idea de que en esas zonas áridas y semiáridas, los llevados y traídos planes de recarga de acuíferos son poco menos que utopías: los volúmenes disponibles, el tiempo necesario para la filtración, la profundidad de los niveles subterráneos, factores necesarios para propiciar la recarga artificial, se contraponen a la apremiante necesidad de los volúmenes para fines más “prácticos”, inmediatos y productivos (IMTA, 2000a).

En los casos como Delicias, de acuerdo con (CNA, 1997), el acuífero regional está “en equilibrio” aparente, es decir, lo que se extrae es aproximadamente lo mismo que ingresa; sin embargo, en los periodos altamente deficitarios en lluvias, como el presente, cuando las aportaciones superficiales son menores, la única fuente alterna es el acuífero, y se echa mano de él a pesar de todas las prohibiciones, reglamentos y planes en contra: la única limitante son los recursos de los *usuarios*, en cuanto a equipo disponible, costo de energía y presupuesto.

¿Cómo convencer y frenar a un usuario que teniendo los recursos para ello, ve disminuir o morir sus plantaciones o animales, de los cuales vive? ¿qué ley o reglamento será capaz de disuadirlo de no sobre explotar el acuífero con miras al futuro? Al usuario le interesa el HOY, y ya después se verá qué se hace y qué pasa.

En este sentido, en la generalidad de los casos y en las condiciones actuales, la recarga artificial de los acuíferos es un objetivo distante y difuso. Por ello, lo más conveniente para conservar, mantener o preservar un acuífero, es disminuir o impedir la extracción, y dejar que la naturaleza haga lo suyo, es decir, que se dé la recarga natural (Moore *et al.*, 1995; Gutiérrez, 1996); después de todo, una formación natural que llevó siglos es poco probable que artificialmente se recupere en unos pocos años o meses. Además, frecuentemente sucede que si se ahorra 1 unidad de agua y se destina a la recarga, en poco tiempo después se extraen 2 o 3, argumentando que ya se había “guardado”.

Indiscutiblemente, al formarse el cuerpo de agua que es un embalse, existe alguna componente o conexión del agua superficial retenida que eventualmente llegue al acuífero, pero ello se toma su tiempo; esta relación no es una dependencia, en el sentido estricto del término, ya que el acuífero tiene siglos de existencia, *ya formado*, mientras que los embalses son mucho más recientes (Moore *et al.*, 1995). Lo que sí ocurre es que las aguas de gravedad aplicadas en la zona de riego, tienen una componente más allá de lo que es estrictamente el uso consuntivo (UC) de las plantas, y que corresponde a la diferencia de la lámina neta con el UC; esta diferencia se pierde por evaporación, coleos, encharcamientos, y además, una porción importante que se filtra más allá de las capas superficiales.

Frecuentemente, a este fenómeno de asocian los problemas de salinidad y drenaje, lo cual es un indicador de que, antes de llegar al acuífero, se manifiesta

de esta forma. Eventualmente, una parte llegará al acuífero, pero es tan lento el avance, que en términos reales no se manifiesta; por eso, los niveles estáticos y dinámicos del acuífero no disminuyen o lo hacen muy someramente, aunque de acuerdo con las investigaciones disponibles (IMTA, 1997), estas variaciones se deben más al flujo lateral, a las aportaciones del propio acuífero en zonas vecinas al bombeo, que a las aportaciones verticales en la zona de riego.

Por otro lado, estas aparentes recargas inducidas al acuífero van tan cargadas de desechos contaminantes, principalmente por agroquímicos, que su calidad deja mucho que desear; por tanto, cabe preguntarse qué tan conveniente es tener un acuífero con abundante agua si ésta no cumple las normas de uso. Esto conduce a afirmar que la contaminación también es una forma de escasez. Por cualquier tipo de contaminación, el agua se vuelve o se puede volver inutilizable, dependiendo del uso a que se destine. Desde luego, la contaminación es relativa, porque así como las aguas de retorno y drenaje agrícola y urbano producen una excelente maleza y que muchas plantas cultivadas alcancen notables desarrollos fisiológicos, también es bien sabido el riesgo de consumir esas aguas por los humanos.

¿Cuándo se pueden hacer recargas artificiales al acuífero? La respuesta más que lógica es: cuando haya agua disponible, pero como esto rara vez sucede en las zonas áridas y semiáridas, la situación se vuelve un auténtico círculo vicioso, cuya ruptura es más probable cuando ya no haya agua disponible en términos económicos o de calidad que la hagan utilizable (Moore *et al.*, 1995).

En México, algunos de los estudios serios que se han hecho en este tema concluyen que la recarga artificial dista mucho de devolver a los acuíferos sus condiciones originales, y que, por tanto, no es la solución; quizá, en el mejor de los casos, sólo parte mínima de la solución (IMTA, 2000; IMTA, 2000a). De acuerdo con esta argumentación, es comprensible que la mejor manera de lograr la sustentabilidad de los acuíferos, particularmente en las zonas más vulnerables, es restringir su explotación a tasas menores a la recarga natural, y para ello se requieren estudios detallados, costosos y tardados; por otra parte, el carácter “invisible” de esta agua dificulta el proceso, lo que frecuentemente lleva a sobre evaluaciones de la potencialidad del recurso.

10.5. EL VALOR ECONÓMICO DEL AGUA

La segunda parte en el proceso de asignación de volúmenes disponibles corresponde a cada uso o sector, hacia sus propios usuarios. Probablemente esta es la parte más conflictiva y difícil, ya que es en la que se asigna a cada usuario, qué parte de la demanda regular dejará de suministrarse, y en consecuencia los efectos que ello tendrá en la economía directa de los usuarios, en sus ingresos derivados de la actividad que tiene al agua como insumo.

Los sectores de bajo consumo relativo, al menos en las primeras etapas de la sequía, en general tienen pocas restricciones, y hasta es posible que el fenómeno no tenga consecuencias importantes en ellos, pues disponen de las

cantidades que suplen sus necesidades. En este sentido, para estos sectores la sequía es muy relativa, y frecuentemente no hay una percepción real de la dimensión del problema. Sólo en las fases avanzadas de la insuficiencia es cuando se presentan los problemas e inicia la fase de preocupación, pero, generalmente por los bajos volúmenes y un mayor poder de adquisición de derechos o de otras alternativas para disponer del recurso, los impactos disminuyen o son relativamente benignos.

En esto cada vez adquiere mayor certeza el principio de considerar al agua como un bien económico, lo que exige poder evaluar la demanda económica para los distintos usos: no se debe continuar realizando estimaciones de las necesidades futuras de agua sobre la base de determinados escenarios de crecimiento, sin tener en cuenta el valor económico del agua en los distintos sectores (Sumpsi *et al.*, 1998). Por desgracia, la atribución de un valor monetario al agua es un tópico muy complejo, ya que dicho valor depende de las características y situación del recurso: volumen, calidad, potencial energético, posibilidades de control y regulación, etc., que son elementos que varían en tiempo y espacio.

Como se ha mencionado, el sector agrícola es el que más agua demanda y usa, y el que en condiciones de insuficiencia, primero sufre el castigo. Se argumenta que este sector es quizá el menos eficiente en el uso del agua, y en ello hay cierta razón, pero debe tenerse presente que para este sector el agua sí es un recurso de consumo, es decir, sí es consuntivo. Por otro lado, aún cuando la actividad agrícola es primaria y define en gran medida el grado de desarrollo de una región o país, su alta vulnerabilidad si se asocia a falta de otras opciones de uso más eficiente del agua, conduce inexorablemente a problemas e inestabilidad cuyo impacto y costo pueden ser muy altos.

La gestión de los sistemas de riego está evolucionando rápidamente, y la participación directa y activa de los propios usuarios le está confiriendo al agua características de bien social que antes no eran comunes: su valor económico y de mercado, las opciones de transferirla y utilizarla en los usos que se consideren más eficientes o utilitarios, y todas las demás variantes que están tomando auge para conferir el verdadero costo de oportunidad que adquiere mayor valor en la medida en que es más escaso; de esta forma, mientras más restricciones y más déficit existe, el valor del agua se incrementa, y no sólo económico (Palerm, 2001). A su vez, esto propicia que la gestión mejore y evolucionen las formas y criterios de uso y manejo, incluidas las opciones de mejora tecnológica.

10.5.1. Visión global del agua

En otras palabras, ante una condición de insuficiencia, si no se hacen cambios profundos en la gestión del agua, la viabilidad de desarrollo sustentable estará seriamente comprometida. Tanto para lograr una visión global del agua, a nivel regional o de cuenca hidrológica y, por supuesto también a nivel sectorial, son necesarias cinco condiciones mínimas y básicas por cumplir (Martínez, 2001):

- Involucrar a todos los actores interesados en la toma de decisiones.
- Avanzar hacia el pago del costo total de los servicios.
- Incrementar el gasto en ciencia e innovación para el agua.
- Cooperación en cuencas internacionales o compartidas.
- Incremento masivo de la inversión en agua.

Estos principios deben conducir hacia el *pensamiento sistémico*, en el que la gestión integral del agua no sólo se entienda como el aprovechamiento del recurso, sino que considere los demás factores que inciden en el proceso, como son los ambientales, sociales, legales, de medio ambiente, etc., y aún más importante, que se produzca el cambio de la aceptación teórica a la adopción en la práctica. Las actuales tendencias en este sentido conducen al concepto de actualidad “conservación del agua”, referido a las actividades que tienden a reducir la demanda de agua y mejorar la eficiencia en su uso.

10.6. EL MEJORAMIENTO TECNOLÓGICO DEL USO DEL AGUA EN EL RIEGO

La asignación del déficit en el sector agrícola es clara y justificable en apariencia al considerar las inversiones y subsidios al sector, y que la eficiencia técnica de uso del recurso es frecuentemente muy baja, ya que en muchas veces no supera el 50%. En estos casos, la solución a los problemas de escasez no consiste en incrementar los volúmenes suministrados a los usuarios -de agua que no se tiene-, sino en facilitar la mejora tecnológica del riego. Cuando esto se consigue, en la medida en que se pueda ahorrar agua destinada al riego -mediante un consumo más racional o a través de la adecuación de los cultivos, por ejemplo-, los impactos de la insuficiencia serán menores y además, no necesariamente se reducirán las superficies cultivadas.

No obstante, mejorar tecnológicamente el uso del agua en el riego tiene un costo económico de inversión frecuentemente alto, que cuando los usuarios no pueden sufragar, el agua no adquiere su valor de oportunidad. Por ello, una de las estrategias más viables, quizá la más efectiva para inducir la conservación del agua, es la actualización periódica tarifaria a niveles de valor real, y en complemento con esto, la dotación a los usuarios finales mediante un esquema de volumen por año, en lugar de los todavía tradicionales cobros por superficie independiente del cultivo y del volumen. La facturación del agua por volumen consumido tiende a reflejar no sólo el costo real del agua por suministro, sino también los adicionales como el costo de depuración de los efluentes, y el resultado es obvio y lógico: el ahorro del agua se traduce en una reducción de los costos a pagar. Dicho en otros términos, la necesidad (escasez) ha sido el principal motor del desarrollo de técnicas ahorradoras.

En México, la administración transferida de los Distritos de Riego (DR) a los usuarios bajo determinados esquemas de organización, contempla que los DR reciban el agua también en bloque: volúmenes definidos en un periodo definido -usualmente por ciclo agrícola-, y en lugares estratégicos, los llamados *puntos de*

control. Aquí, el más alto nivel de organización de los usuarios -la Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) cuando existe, o bien la Asociación de Usuarios (AU), en DR pequeños- recibe los volúmenes y gastos programados que corresponden a su dotación en ese periodo..

Un aspecto que debe tenerse presente tanto en la planeación como en el proceso de asignación y desde luego en la operación de los sistemas de riego, es que la función de demanda, además de inestable en el tiempo, es estacional, y la intensidad de esta estacionalidad depende en mucho de factores aleatorios, entre ellos los meteorológicos (Sumpsi *et al.*, 1998).

Los volúmenes asignados a los DR dentro de una cuenca o sistema hidrológico, en periodos de escasez llevan implícita la demanda no suministrada, es decir el déficit. A su vez, estos volúmenes disponibles en las fuentes de abastecimiento (embalses y/o acuíferos), deben asignarse y distribuirse a los usuarios organizados. Usualmente, la distribución global del agua disponible es en base a la superficie a beneficiar, considerando láminas históricas promedio: volumen disponible entre lámina bruta media da una superficie global, que es una primera aproximación de cuánta superficie se puede beneficiar.

Desde luego, es preciso tener presente que el trayecto del agua desde la fuente de abastecimiento -el embalse-, hasta los puntos de control donde recibe la SRL existen pérdidas, y una proporción de las mismas son intrínsecas e inevitables, lo que disminuye los volúmenes que la SRL tendrá disponibles para distribuir en el siguiente nivel operativo.

El control y manejo de las pérdidas en este nivel contribuye a que las láminas brutas disminuyan, y con ello a que la superficie pueda aumentar. En condiciones de escasez no es fácil suplir las láminas (brutas o netas) promedio registradas, sino que, a fin de que la superficie no resulte tan reducida, lo que más comúnmente se hace es reducir las láminas.

En el último nivel administrativo de la asignación y distribución del agua y del déficit, las AU o módulos reciben el agua también en bloque de la SRL y lo distribuyen a los usuarios. En esta fase también hay las correspondientes pérdidas, las de "red menor", que inciden en los volúmenes que finalmente llegan al usuario.

Un aspecto importante a considerar en el nivel del agricultor común de riego es que, en la manera tradicional de regar, es usual encontrar la idea -y la práctica- entre los usuarios de que un cultivo, cuando se riega por gravedad, no está bien regado sino hasta que el terreno está inundado. Desde el punto de vista de la moderna ingeniería de riego, esto es una exageración, pues lo que sucede es que se está aplicando agua en exceso, lo cual, frecuentemente no sólo no beneficia a las plantas, sino que disminuye sus rendimientos, y tiene efectos colaterales como problemas de drenaje y de salinidad en el suelo, y, en las mencionadas situaciones de escasez, ello simplemente significa agua desperdiciada.

Por ello, disminuir las láminas netas no necesariamente significa castigar al cultivo, ya que éste necesita una cantidad menor de agua, lo que es el *uso consuntivo de la planta*, que usualmente es significativamente menor que la lámina neta. Desde luego, en el riego por gravedad esto no es tarea fácil, pues el agua se aplica y moja más del área de raíces; además son frecuentes las condiciones de nivelación deficiente, pendientes excesivas o menores a las necesarias, y otras, que implican que la eficiencia sea baja. Estas láminas netas son menores y más cercanas a los usos consuntivos en la medida en que el riego es tecnológicamente mejor: aspersión, goteo, hidroponía. Pero, a la vez, esto requiere inversión, tanto estructural en equipo como no estructural en el cambio de mentalidad y en la visión del sentido económico de la actividad agrícola y el valor del agua. Por esto se dice con validez que la escasez, entre uno de los pocos aspectos positivos que tiene, es impulsar el cambio tecnológico.

10.6.1 Eficiencia en el uso del agua de riego

Así entonces, del agua disponible y asignada al sector agrícola, desde que sale de la fuente de abastecimiento hasta que llega al usuario final sufre una serie de pérdidas que frecuentemente son muy significativas -entre 20 y 35%- y que se deben tomar en cuenta al calcular las láminas y superficies efectivas de riego. A nivel de parcela, las pérdidas por sobre riego, que dependen básicamente del nivel tecnológico del usuario, también pueden ser muy importantes, entre 20 y 40% del agua recibida, de manera que en el recuento total, es sólo una fracción, a veces menor que la mitad, el agua que realmente se aprovecha.

Estos son factores que deben tomarse en consideración, pues cualquier mejora en la eficiencia significa importantes volúmenes recuperables que, en la medida en que las condiciones se hacen más críticas, adquieren un mayor valor.

Mejorar la eficiencia en el uso del agua a nivel parcelario, además de las medidas estructurales a través de técnicas modernas como el riego a presión, también tiene una componente *científica*: mejorar la gestión interna buscando las opciones más convenientes para obtener el máximo beneficio, ya sea por implantar los cultivos más convenientes a las condiciones presentes, por aplicar sólo el agua necesaria, por reducir o combinar superficies, y, en fin por las diversas opciones que se puedan tener para maximizar el ingreso económico. En este sentido Aguilar y García (1995), y Krinner (1995), mencionan y proponen técnicas de optimización del uso del agua que permiten calcular las mejores opciones para tal propósito. No obstante, los bajos costos del agua explican porqué muchos usuarios no invierten en mejoras de la eficiencia del uso del agua.

Ya sea a nivel de DR o de módulos, la asignación final al usuario debe hacerse con los mencionados criterios de equidad, igualdad, eficiencia y justicia social. Esto significa usar métodos como el de la curva de usuarios, que provee una base común, expresable en superficie o volumen, con la que todos los usuarios tengan al menos, la misma oportunidad del acceso al servicio en las mismas condiciones.

La actual tendencia a cobrar el servicio de riego en forma volumétrica es probablemente la mejor opción, y cuando a todos los usuarios de riego se aplica la misma dotación, entonces todos pagarán la misma cantidad por el mismo volumen; lo limitado de éste es lo que impele a los usuarios a hacer un mejor uso o a obtener el mayor beneficio. Ello puede traducirse en la mejora tecnológica y/o en las opciones económicas de mercado.

La eficiencia dependerá, como se ha dicho, del nivel tecnológico del usuario. En las ocasiones en que sobre esta base de dotación volumétrica los volúmenes son tan bajos que resultan poco atractivos para individualmente usarlos en el riego, es cuando, por el alto valor que adquiere el recurso, surge y toma auge la economía del agua, a través de diversas variantes (Sumpsi *et al.*, 1998):

- *Mercados corrientes o de alquiler*: que implican una venta de agua, en caudal o volumen, por un tiempo determinado: meses, ciclo, año agrícola; son los llamados *mercados de aguas*.
- *Mercado de derechos*: en los que la propiedad del agua se transfiere como si fueran propiedades sobre bienes raíces o acciones de sociedades limitadas.
- *Mercados de opciones*: con los que se transfiere la opción de usar el agua durante determinado tiempo, y el que adquiere el derecho no está obligado a ejercerlo pero sí a cubrir el importe pactado al vendedor.
- *Acuerdos de transferencia temporal de agua a cambio de inversiones en equipo y/o mejoras*: por el uso del agua, el adquiriente acepta invertir en el patrimonio del vendedor, a cambio de adquirir el derecho a apropiarse los volúmenes ahorrados debido a las mejoras.

10.7. EL MERCADO DEL AGUA

No debe confundirse mercado de aguas con mercado de derechos: en el primero lo que se intercambia es el acceso temporal al recurso, mientras que en el segundo se transfiere la propiedad completa del agua.

En referencia a los mercados de agua desarrollados por efecto de la ley de oferta y demanda y con sustento legal, pueden identificarse cinco formas organizativas:

- *Subastas de agua*, básicamente para negociar sobrantes de la dotación al mejor postor.
- *Bancos de agua*, similares a los mercados de bienes raíces, en los que existen intermediarios o corredores que, mediante el pago de comisiones, hacen las operaciones de compra-venta de los volúmenes de agua, en representación de vendedores y compradores.
- *Pactos de compra-venta de volúmenes mediante redes digitales de comunicación*, en desarrollo en comunidades de regantes tecnológicamente

avanzadas, que a través de internet hacen las transacciones mercantiles (Olmstead *et al.*, 1997, citado por Sumpsi *et al.*, 1998).

- *Centros públicos de contratación o creados en el seno de los organismos públicos en materia de agua.* Usualmente en México esto tiende a ser más común dentro de las SRL y las AU, que actúan como organismos reguladores, de tal suerte que los volúmenes asignados a cada parte no se transfieran espacialmente a áreas ajenas o externas, para salvaguardar la dotación asignada y sostener la eficiencia con la que se maneja el sistema hidráulico.
- *Transmisión de derechos sobre el agua a cambio* de la realización de obras hidráulicas o de mejora de las instalaciones por parte del adquirente, y el vendedor acuerda con el adquirente ceder temporal o permanentemente una parte de su volumen.

En los lugares donde funcionan o es factible que funcione el mercado del agua, el sector agrícola es el usuario mayoritario; las cantidades demandadas por otros sectores son sólo una fracción del sector agrícola, y por ende las transacciones tienen un costo relativamente bajo para ambos actores, vendedor y comprador.

Los mercados de agua tienen ciertas ventajas, entre las cuales se pueden mencionar:

- Son una eficiente alternativa para evitar la construcción de costosas obras hidráulicas cuyo uso sería sólo en temporadas de escasez.
- Pueden ser una buena alternativa estratégica para que, en base al ahorro de agua por su valor real, los organismos públicos responsables del manejo y administración de las cuencas obtengan recursos hídricos que se destinen a fines ecológicos y ambientales, a bajo costo, por ejemplo, para destinarlos a la recarga de los acuíferos.
- Promueven el desarrollo de los cultivos más intensivos y productivos en detrimento de los extensivos y de baja rentabilidad, y contribuyen así al mayor valor de la producción y a la generación de empleos relacionados con la agricultura.
- Impulsan la modernización de las zonas de riego, ya que los usuarios pueden financiar las inversiones en modernizar sus riegos con los ingresos de la venta de agua.
- Permiten adaptar la gestión del agua a la evolución de las sociedades donde el peso del sector agrícola pierde fuerza en favor de los usos no agrícolas.

No obstante esto, existen algunas desventajas que es preciso tener en mente:

- Autorizar sin restricciones que los usuarios transmitan y comercien con sus derechos de agua a otros usuarios o sectores, puede producir impactos

negativos en las economías rurales de origen, y el riesgo de perder el control en la gestión.

- La idiosincrasia predominante puede enturbiar la imagen de los usuarios que trafican con sus derechos, y poner en tela de juicio la transparencia de la cesión interesada de recursos vitales para la comunidad.
- Si la reglamentación y normas legales no son firmes, la seguridad y protección para los pequeños titulares de los derechos son laxas y hay el riesgo del monopolio, con la imposición de condiciones transaccionales poco equitativas para los usuarios de origen.
- Las transacciones fuera del sector que no cumplan con el pago de las obligaciones económicas derivadas del empleo original del agua son un riesgo para la viabilidad técnica y económica de la AU cedente, incrementando los costos de gestión y alterando el equilibrio financiero.

La inseguridad en la lluvia y por ende en la garantía de suministro de volúmenes que satisfagan la demanda del uso agrícola principalmente y de los demás sectores en general, y las grandes variaciones físicas, demográficas, estructurales y socio-económicas de las diversas regiones y cuencas, hacen imposible formular un plan general de gestión de los recursos que contemple todos los casos. Por ello se dice que un plan para enfrentar la sequía es como un traje a la medida, y más aún puede agregarse que debe ser un traje a la medida y para cada ocasión, es decir, un solo plan es insuficiente para cubrir todas las fases de la escasez. Por ello, el plan debe ser lo suficientemente flexible para que sea adaptable a las diversas situaciones que progresivamente se pueden presentar en una misma cuenca o región.

10.8. ORGANIZACIÓN Y ESTRATEGIA PARA AFRONTAR LAS SEQUÍAS

La insuficiencia de agua para satisfacer la demanda en condiciones medias, es un fenómeno que obedece a determinadas formas de comportamiento: es de avance gradual en el tiempo, su impacto se amplifica en cada fase progresiva, el tiempo de recuperación está en función del impacto, la severidad y la duración, y tiende a abarcar amplias regiones geográficas.

El fenómeno tiene impactos diferentes en cada sector usuario, en función de los volúmenes que utilice cada uno, de la vulnerabilidad a la insuficiencia de agua, y de la flexibilidad para adaptarse a situaciones temporalmente restrictivas, entre otros factores. Entonces la mejor estrategia para afrontarla es tomando medidas precautorias. La previsión, una de cuyas componentes es el ahorro de agua en épocas de abundancia para usarla en temporadas de escasez, es posiblemente la medida más apropiada que permite afrontar el fenómeno con mayores posibilidades de éxito.

Durante la sequía, la administración y planeación del uso de los sistemas hidráulicos e hidrológicos, adquiere especial importancia porque se debe operar de tal manera que se optimicen los volúmenes disponibles y se satisfagan los requerimientos de manera apropiada. La incertidumbre intrínseca al proceso

hidrológico de las aportaciones influye sensiblemente en este aspecto (Anis, 1979). Éste es el contraste en el que la demanda debe adaptarse a la oferta, y no a la inversa. Es también la situación donde se debe encontrar el punto de equilibrio entre la necesidad de uso actual con el máximo de beneficios económicos y la oferta disponible, así como con la conveniencia de balancear y distribuir el agua ofertable tanto dentro de un periodo (meses del año) como entre varios periodos sucesivos (años del horizonte de planeación), de tal forma que se logre la sustentabilidad.

Así, la asignación anual o periódica de los volúmenes disponibles debe estar basada en determinados criterios que pretenden balancear tanto el aspecto técnico como el social y económico; en este sentido, establecer prioridades es tan importante como establecer límites al uso del agua, con el objetivo de alcanzar un equilibrio apropiado entre oferta y demanda (Prat i Fornells, 1996), a corto y mediano plazos.

Como se ha argumentado, además de las implicaciones técnicas y económicas que trae consigo la presencia del déficit de agua, su componente social adquiere dimensión de máxima importancia, pues está directamente relacionada con el grado de bienestar de la sociedad, fundamentalmente por la seguridad de suministrar los requerimientos mínimos para las necesidades básicas del ser humano (Gleick, 1996): si se puede asegurar que la población disponga de una cantidad mínima de agua para sus necesidades esenciales, considerado este aspecto como el de máxima prioridad, la falta o insuficiencia de agua para los demás usos es más fácilmente soportable.

10.8.1. Fases de ocurrencia de la sequía y el déficit de agua

Las estrategias que se adopten para afrontar las sequías dependen principalmente de la fase en que el fenómeno se encuentre. Las fases progresivas convencionalmente aceptadas se muestran en la Tabla 10.1, en la que, además de las acciones que son competencia de los responsables de administrar el agua, también se anota la participación de los usuarios, siendo este aspecto básico en el contexto general de acciones, ya que la participación popular, es un factor clave en que las acciones que se tengan que hacer resulten exitosas.

Las dependencias como CNA, en el ámbito federal, así como los gobiernos estatales y municipales, son responsables de la administración global del agua y de que este recurso alcance el objetivo de atender necesidades de interés nacional, y en ello deben participar instituciones y organismos afines o relacionados, así como representantes de sector usuario; a nivel local, además de lo anterior, es también importante que los usuarios participen en los análisis y decisiones que competen al sistema del que se sirven; no implica que sean dueños del mismo, sino concesionarios del recurso y las obras, propiedad de la nación (como son los actuales módulos de riego en los DR), para su mejor funcionamiento y aprovechamiento. La participación pública de los usuarios en las decisiones y responsabilidades de administrar el agua es un aspecto que le da el

carácter de recurso comunitario, orientado a satisfacer las necesidades de la población en general con sentido social.

Tabla 10.1. Fases progresivas de una sequía, y acciones y recomendaciones básicas para afrontarla (Velasco, 2002).

Fase	Acciones de las Autoridades	Acciones de los usuarios sectoriales e individuales	Recomendaciones
<p>1 Incipiente</p> <p>Comienza la sequía; la reducción en la oferta de agua es de 5 a 10% respecto a la demanda.</p>	<p>Campaña inicial de información: alerta para disminuir los usos no esenciales, y difusión de pronósticos y de acciones necesarias si la situación empeora. Levantamiento de censos y elaboración de estadísticas para conocer el uso y asignación del agua. Formulación de una propuesta para disminuir la asignación a los usos secundarios.</p>	<p>Los usuarios deben moderar su consumo de agua y restringir los usos no prioritarios voluntariamente. Los grandes usuarios deben revisar sus planes de contingencia.</p>	<p>Campaña educativa para evitar el desperdicio del agua. Revisión de las instalaciones y dispositivos de medición y control hidráulico.</p>
<p>2 Moderada.</p> <p>La disponibilidad es del 10 al 20% inferior respecto a la demanda. Algunas medidas son voluntarias, pero otras ya son obligatorias.</p>	<p>La campaña de información se intensifica e incluye aspectos técnicos del problema. Se formula la etapa inicial de racionamiento y se da a conocer. La aplicación del riego sólo es permitida en las horas de menor insolación. Prohibición total de usos no prioritarios. Instrumentación de las primeras medidas de multas por exceso o uso indebido del agua, con base en leyes y reglamentos. Prohibido lavar con manguera vehículos, banquetas y calles.</p>	<p>Los usuarios comerciales e industriales instrumentan sus planes de acción, destacando entre ellos el reuso y/o recirculación del agua para sus procesos. Todos los usuarios se sujetan a las restricciones y prohibiciones.</p>	<p>Se intensifica la campaña informativa y educativa. Se instalan dispositivos ahorradores de agua y se mejoran los de control. Inicia la aplicación de sanciones por uso excesivo o indebido; en reincidencias, se suspende temporalmente el servicio.</p>

<p>3 Severa.</p> <p>El déficit es de 20 a 35% en relación con la demanda. Las medidas de reducción y restricción en el uso del agua son obligatorias.</p>	<p>Se aplican las medidas y programas de racionamiento, y las sanciones por su no observancia. Los usos domésticos deben disponer de equipos de bajo consumo. El suministro se realiza sólo para los usos esenciales, con estricto tandeo y restricciones en volumen. La campaña de información es intensa y en detalle, apoyada en todos los medios. La evolución del estado de emergencia se registra permanentemente, y los pronósticos y evaluaciones se realizan todos los días para detectar cualquier variación.</p>	<p>Los usuarios son conminados a apearse totalmente a las restricciones y racionamientos del plan de emergencia. La vigilancia entre sectores y usuarios es continua para evitar desperdicios y conflictos, tomas clandestinas y usos no autorizados. Los grandes usuarios operan de acuerdo con sus planes de contingencia y se sujetan sólo a los volúmenes autorizados.</p>	<p>Se incrementan las sanciones y se restringe más el consumo. Sólo se autorizan usos prioritarios con volúmenes mínimos. Si se detectan y persisten usos indebidos, se suspende el suministro, se aplican las sanciones y se disminuye la dotación. Es obligatorio mejorar las instalaciones y dispositivos.</p>
--	---	--	---

<p>4 Crítica.</p> <p>El déficit está entre el 35 y 50% respecto a la demanda. Las reducciones, restricciones y observancia de los planes de contingencia son rigurosamente observados y sancionados.</p>	<p>Todas las restricciones y racionamientos alcanzan su máxima intensidad; las dotaciones son mínimas y acordes con los esquemas de prioridad, exclusivamente para los usos más elementales, sin excepción. Los tandeos son rigurosamente observados. La vigilancia es extrema y continua sobre el funcionamiento de los sistemas de conducción, distribución y medición; cualquier anomalía se atiende de inmediato. Todos los usuarios se ajustan a su dotación y se resuelven los conflictos entre ellos. Las contingencias ambientales se atienden de acuerdo con los ordenamientos de ley y entran en función los planes de emergencia apoyados por todos los niveles de gobierno. La campaña de información, seguimiento y educación alcanza su mayor intensidad y es permanente.</p>	<p>Los usuarios deben cumplir estrictamente con el plan de racionamiento. Todo ahorro de agua es crucial, por lo que no debe haber desviaciones ni desperdicios. Los dispositivos de medición, control y uso deben funcionar en estado óptimo. Los usos no residenciales se reducen al mínimo o se suspenden. La recirculación, tratamiento y reuso de agua son importantes como opciones para elevar la disponibilidad.</p>	<p>Se aplican las sanciones y penas más severas; por faltas, la suspensión del servicio puede ser indefinida. La participación de los usuarios en el manejo, cuidado y vigilancia en el uso del agua son determinantes para evitar el aumento del problema y el eventual colapso total.</p>
---	---	--	---

<p>5 Catastrófica</p> <p>El déficit es superior al 50% de la demanda. Son las condiciones más drásticas, de sobrevivencia.</p>	<p>El agua disponible se asigna únicamente para los usos más prioritarios y en cantidades muy limitadas. La asistencia social y los planes de emergencia son constantes con el apoyo de las autoridades de todos los niveles. El agua se distribuye con el máximo de precaución para evitar pérdidas y conflictos. es una etapa de espera hasta que las condiciones mejoren.</p>	<p>Usan el agua sólo para lo estrictamente autorizado y con el mínimo de volumen. No se permite ningún exceso. Los usos más prioritarios con la menor dotación. Los excedentes se distribuyen a los demás usuarios.</p>	<p>Cero desperdicios y cero tolerancia. los mecanismos de medida y control funcionan correctamente y se supervisan con frecuencia.</p>
--	--	---	--

A partir de estas consideraciones, es inobjetable que uno de los aspectos más importantes en afrontar las sequías es la organización firme y estrecha entre las diversas partes: los administradores del recurso y los usuarios. Como la sequía afecta a toda la sociedad, entonces también toda la sociedad debe involucrarse en buscar y encontrar opciones viables que permitan soportar el embate y mitigar sus efectos.

10.8.2 Estrategias específicas para afrontar la sequía

Esta organización debe darse para generar y atender eficientemente estrategias y tareas específicas, que formen parte de un plan de acción que contenga en su conjunto el *qué*, *cómo*, *cuándo* y *quién* habrá de hacer las cosas, cuya respuesta se refleje en el plan y atienda a las necesidades globales, así como a las de cada sector usuario. Entre los aspectos básicos del *qué* atender destacan los siguientes:

Pronóstico: aunque el fenómeno en sí mismo es aún impredecible por el alto grado de incertidumbre natural, sí es importante conjuntar elementos que permitan visualizar con cierto margen de aproximación las posibles condiciones más inmediatas (a un día, semana o mes posterior), a partir de las últimas registradas. El objetivo es que para los próximos meses, al menos un año en el caso de las áreas de riego, pueda tenerse un escenario posible sobre el cual moderar las condiciones de demanda, asegurar las reservas más prudentes, y alertar a la población sobre la posibilidad y riesgo de la presencia del fenómeno. Esto es, siempre es útil visualizar algunas posibles tendencias que permitan a su vez, intuir probables líneas de acción apropiadas a cada circunstancia.

Monitoreo y seguimiento: que implica ver retrospectivamente y con detalle la evolución de la sequía y los efectos que ha tenido (el aspecto histórico del fenómeno), así como la efectividad o deficiencias de las acciones y estrategias realizadas. Ello mejora las que son útiles y descarta las que no lo son, permite corregir posibles errores y aporta criterios para afinar procedimientos que en eventos futuros permitan obtener mejores resultados. Además, adicionalmente ayuda a conservar registros de lo que históricamente ha ocurrido, en todos sus aspectos, que son experiencias valiosas para fundamentar los criterios y acciones de mayor valor; es decir, se enriquece el proceso de planeación y el operativo cuando la emergencia se presenta, con resultados más positivos.

Evaluación: cuantificar los efectos de la sequía, en términos materiales y económicos, principalmente, es imprescindible para evaluar cuál ha sido el efecto global del fenómeno, y cómo ha sido la afectación en el tiempo por sector, su evolución y consecuencias en todo el contexto social del área. Además, ello permite apreciar las diferencias entre sectores, y con ello establecer su vulnerabilidad o su capacidad de resistencia a las situaciones de déficit. La evaluación, además de su aspecto económico, también debe incluir los efectos en otros sentidos: el impacto social, en pérdida de empleo y de poder adquisitivo, de las condiciones de salud y bienestar; el impacto ecológico y ambiental, en cuanto a la degradación de los ecosistemas naturales y la dificultad de su recuperación

El *cómo* realizar estas acciones es una tarea que en las fases iniciales del fenómeno, en general la realiza la entidad administradora del agua, es decir, en principio la CNA; más específicamente, estas funciones son responsabilidad del Consejo de Cuenca o en su caso, de la Gerencia Regional. En forma complementaria y no menos importante, organismos y dependencias tales como la SAGARPA, las Juntas Municipales de Agua y Saneamiento (JMAS), las asociaciones de usuarios (AU), los gobiernos de los estados, instituciones educativas y no gubernamentales, y otras entidades relacionadas con el uso y manejo del agua, que en forma sistemática recopilan información meteorológica, hidrométrica, económica, agrícola, etc., pueden contribuir con esa información para mejorar la evaluación de la situación actual, así como el registro histórico del fenómeno, y dar elementos adicionales al análisis de los diversos componentes (NMDP, 1998).

En la medida en que las fases de la sequía son más severas, también son más necesarios los requerimientos de información para mejorar las decisiones. Para estos requerimientos se incrementa la frecuencia y cantidad de la información relacionada con lluvias, temperaturas, almacenamientos, niveles del agua, volúmenes extraídos y demandados, etc. Así, la frecuencia de los datos llega a ser diaria e incluso horaria, y para ello es necesaria la participación de

otras dependencias e incluso de la misma población civil. Para obtener la mayor utilidad de este proceso, la información debe fluir con oportunidad a través de cauces convenientemente establecidos, hasta llegar a las instancias de análisis y decisión.

Los formatos, tiempos y formas de recopilación, envío, análisis, difusión y puesta en práctica de las decisiones debe estar especificada para cada nivel o fase de la emergencia. Así, es la organización multidisciplinaria de la que forman parte todas las instituciones, dependencias y representantes de los usuarios, la que debe generar estos detalles, para cada caso y fase del fenómeno

El *cuándo* está referido básicamente a la frecuencia con que se debe analizar la situación, lo cual a su vez depende de las condiciones o fases de la sequía: si el déficit no existe, una revisión de las condiciones hídricas generales cada seis meses será suficiente, sobre todo al inicio del ciclo, que es cuando se definen y asignan los volúmenes por derecho, según sea la disponibilidad, las expectativas y los requerimientos y deseos de los usuarios. Esto es, al 1 de octubre de cada año, inicio del año agrícola e hidrológico, con base en las condiciones imperantes, es cuando se hace la asignación anual. A fines de marzo se hace una revisión, para en su caso hacer los ajustes necesarios, ya sea a la baja con algunas restricciones por un comportamiento de la lluvia y el escurrimiento menores a lo esperado, y en general por la evolución completa del medio ambiente y del uso del agua, o bien a la alta, cuando las condiciones invernales esperadas son superadas y se tiene oportunidad de realizar segundos cultivos, por ejemplo, o de destinar el agua disponible para otros usos como recarga de acuíferos, sustitución del bombeo, combate de malezas, etcétera.

En la fase incipiente, análisis de detalle cada tres meses permitirán seguir de cerca la evolución del fenómeno y, eventualmente, avizorar incrementos en la gravedad. Cuando se detecta esta fase, en sus primeros síntomas, es oportuno activar la alerta temprana: avisar a todos los usuarios del riesgo cercano de una escasez, para que la población y las autoridades tengan oportunidad de tomar las precauciones necesarias. El principal indicador es cuando no se alcanza a cubrir el total de la demanda, y se presenta un déficit no mayor del 10% de la demanda media. Si esto ocurre, las dependencias e instituciones relacionadas con el problema deben hacer público tal hecho, además de que los representantes de cada sector usuario también lo hagan en sus respectivas áreas de influencia, todo ello con el fin de poner sobre aviso a los usuarios de la posibilidad de que en un futuro cercano el déficit se incremente. Es la fase apropiada para revisar las estrategias disponibles, actualizarlas y ponerlas en condición de operar de inmediato. Los usos no prioritarios ni esenciales se limitan y se activa la campaña de ahorro.

En la fase moderada, análisis mensuales son suficientes para tomar las medidas pertinentes que permitan tener bajo control la situación. Aunque aún la situación no es tan difícil, pues el déficit no pasa del 20%, sí se debe tener presente el riesgo de incremento en la escasez y los consecuentes problemas. Por

ello, las restricciones que se establecen deben atenderse puntualmente por todos los usuarios, e inician las sanciones por su no observancia. El racionamiento que inicia en esta etapa debe servir para estimular el ahorro, y los usos no prioritarios deben suspenderse totalmente.

Si la sequía es severa, la situación de alarma generalizada obliga a hacer análisis semanales e incluso más frecuentes del desarrollo de la emergencia, ya que es preciso mayor detalle del comportamiento de la situación en general, tanto de demanda como de abasto, y la necesidad de conocer cómo evolucionan las condiciones ambientales es imprescindible para que las decisiones sean las más adecuadas. En esta fase, las condiciones de baja disponibilidad y el pronóstico poco favorable hacen que las restricciones se observen minuciosamente, y que las faltas se sancionen indefectiblemente. Los métodos y mecanismos para ahorro de agua están en su totalidad activados, y sólo los usos esenciales están permitidos. La difusión y vigilancia de las disposiciones y la participación de los usuarios son cruciales para que las disposiciones oficiales tengan efecto y además son de carácter obligatorio.

En la fase crítica, las condiciones imponen que la recopilación de información, su análisis y las decisiones a realizar sean diarios. El déficit va del 35 al 50% y es tal la gravedad de la emergencia que requiere la coordinación más estrecha y oportuna entre las diversas partes, para que de manera conjunta se tomen y ejecuten las decisiones que impidan más deterioro y el eventual colapso. En estas condiciones la tensión por la insuficiencia de agua es tan tirante que el riesgo de conflictos aumenta sensiblemente hasta convertirse en un potencial detonador que conduzca al caos, sobre todo cuando no se satisfacen los requerimientos mínimos para consumo humano. Esta es una situación muy delicada, donde la imparcialidad, justicia y equidad adquieren su mayor dimensión, y son más que indispensables para contener la inestabilidad social. Sin excepción, sólo los usos más prioritarios tienen asignación limitada, y es precisa una vigilancia estricta de su cumplimiento. La difusión informativa y de orientación tiene un valor clave en las respuestas de la población a las estrategias implementadas por el organismo rector de atención del fenómeno.

Aunque no siempre es admisible, porque no debiera llegarse a estos niveles de déficit, es posible alcanzar una fase catastrófica, cuando el déficit es mayor del 50% de la demanda. En estos casos, lo más importante es proteger el consumo humano, y tener un cuidado extremo para que la situación no avance. Ello impone un seguimiento de la situación continuo y constante, con registros horarios y con la mayor expectativa en cuanto al pronóstico y evolución de las condiciones. En consecuencia, la difusión, vigilancia y control de los volúmenes que se usen y cómo se usen alcanzan su máxima expresión.

Quién debe realizar estas tareas también está en función de la fase de la emergencia. Aunque la administración del recurso está reglamentada y es responsabilidad de CNA, bajo la figura organizativa del Consejo de Cuenca, tal y como se establece en la Ley, en condiciones de emergencia por sequía, es

preciso que toda la sociedad se involucre, y más en especial los sectores usuarios. La participación social es un elemento clave en que las decisiones tengan éxito: si la población se mantiene al margen del problema, como simple espectador y no hay una participación decidida y efectiva en cuidar un recurso común, no hay seguridad en el éxito de las medidas a tomar.

Como una consecuencia lógica, para afrontar exitosamente la sequía debe haber una figura organizativa orientada exclusivamente hacia ese fin. Ello sería el Grupo Técnico Directivo. En este esquema deben intervenir tanto las autoridades del agua (CNA) como de otras dependencias e instituciones, así como representantes de los sectores usuarios. Cada persona integrante de este grupo debe tener asignadas determinadas responsabilidades, adecuadas a su perfil, experiencia, intereses, capacidad y origen, y todos en conjunto deben aportar, integrar y analizar la información, de tal suerte que el resultado sea congruente, oportuno y útil para atender y afrontar los problemas que el fenómeno trae consigo.

Así, la respuesta a *quién* debe realizar estas tareas es todos los integrantes del grupo, y, en última instancia, toda la sociedad; todos se deben volver vigilantes, ejecutores, recopiladores e informadores de todos los aspectos de un fenómeno que afecta a todos.

10.9. LITERATURA CITADA

Aguilar Chávez, A. y N. H. García Villanueva. 1995. Modelo de optimización en granjas considerando cultivos de secano. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. X, Núm. 2, mayo-agosto. México. pp 45-51.

Anis, A. A. 1979. *The Linear Reservoir With Markovian Inflows*. WRR 15(6):1623-1627.

Castillo Ríos, D. 2001. Sequía: guía para la elaboración de planes de contingencia y Acciones específicas para enfrentar sequías. Tubos en Concreto, revista de difusión técnica. Año 7, números 72 y 73, julio y agosto. México., págs. 2-5 y 2-6, respectivamente.

CNA. 1997. *Programa Hidráulico de gran visión del Estado de Chihuahua.1996-2020*. Subdirección General de Programación, Gerencia Regional Norte, Gerencia estatal en Chihuahua. 3 tomos.

Collado, J. 1998. Uso eficiente del agua en cuencas. *Ingeniería Hidráulica en México*, XIII(1):27-49, enero-abril.

Gleick, P.H. 1996. *Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs*. IWRA, Water International, 21, 83-92.

Gutiérrez Ojeda, C. 1996. *Metodologías para estimar la recarga de acuíferos*. IMTA. Documentación Interna, Coordinación de Tecnología Hidrológica. Jiutepec. Mor. pp. 129.

Hernández Garcíadiego, Raúl. 2004. Comunicación personal contenida en <http://mx.groups.yahoo.com/group/red-ISSA/>, Resumen 1296 de fecha 25 de enero de 2006.

IMTA. 2000. *Sistema de recarga artificial en el acuífero de la Comarca Lagunera, Coahuila*. Informe del proyecto TH-9916. Coordinación de Tecnología hidrológica. Jiutepec. Mor., pp. 141.

IMTA. 2000a. *Sistema de recarga artificial en el acuífero de la Comarca Lagunera (segunda etapa)*. Documentación interna, Coordinación de Tecnología Hidrológica. Jiutepec, Mor. pp. 83.

IMTA. 1997. *Metodología para estimar la recarga de acuíferos (2ª. Etapa)*. Informe del Proyecto TH-9719. Jiutepec, Mor., pp. 101.

NMDP. 1998. New Mexico Drought Plan. State of New Mexico, Office of the State Engineer. Santa Fe, NM, USA.

Krinner, Wolfgang. 1995. *Influencia de los aspectos de organización y gestión en la eficiencia de los sistemas de riego*. CEDEX: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, España. pp. 251.

Martínez Austria, P. 2001. Paradigmas emergentes para el manejo del agua en el siglo XXI. *Ingeniería Hidráulica en México*, Conferencia Enzo Levi. Vol XVI, número 4, II Época. octubre -diciembre de 2001. pp. 127-143.

Moore, J., A. Zaporozec, and J. Mercer. 1995. *Groundwater - A Primer*. AGI Environmental Awareness Series: 1. American Geological Institute, Alexandria, VA. USA. pp.53.

Palerm Viqueira, J. 2001. Administración de sistemas de riego: tipos de autogestión (nuevas noticias). XI Congreso Nacional de Irrigación, artículo ANEI-S70105. Guanajuato, Gto. México.

Prat i Fornells, N. 1996. *La gestión ecosistémica del agua, necesidad de una visión integrada. Tecnología del Agua*. No. 150, abril, pp. 63-70.

SumpsiViñas, J. M., A. Garrido Colmenero, M. Blanco Fonseca, C. Varela Ortega, y E. Iglesias Martínez. 1998. *Economía y política de gestión del agua en la agricultura*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España, pp. 351.

Velasco, Israel. 2002. Plan de preparación para afrontar sequías en un distrito de riego. Tesis doctoral. UNAM-División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería. México, pp. 193.

Velasco, Israel, y Jaime Collado. 1998. Elementos de planeación para afrontar sequías. XV congreso Nacional de Hidráulica. Oaxaca, Oax. México.

Revisión Técnica y Edición:

Angel Gabriel Bravo Lozano
Mario D. Amador Ramírez
Alfonso Serna Pérez
Guillermo Medina García

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS
Kilómetro 24.5 Carretera Zacatecas-Fresnillo
Apartado postal No. 18
Calera de V.R., Zac., 98500

Tel: (478) 9-85-01-98 y 9-85-01-99
Fax: (478) 9-85-03-63

Correo electrónico: direccion.zac@inifap.gob.mx
direccion@inifapzac.sagarpa.gob.mx
Página WEB: <http://www.inifap.gob.mx>
<http://www.inifapzac.sagarpa.gob.mx>

Publicación realizada con recursos de:

Dirección Regional Norte Centro

Campo Experimental Zacatecas

Fundación Produce Zacatecas, A.C.

Esta publicación se terminó de imprimir en diciembre de 2006.
Tiraje: 500 ejemplares

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

M.C. Agustín F. Rumayor Rodríguez Dir. de Coordinación y Vinculación

PERSONAL INVESTIGADOR

M.C. Ma. Dolores Alvarado Nava Tecnología de alimentos
Dr. Mario Domingo Amador Ramírez Control de malezas
M.C. Ángel Gabriel Bravo Lozano Uso y manejo del agua
M.C. Bertoldo Cabañas Cruz Cereales
Dr. Francisco G. Echavarría Chairez Sistemas de producción
M.C. J. Santos Escobedo Rosales Sistemas de producción
M.C. Guillermo Galindo González Divulgación
Dr. Ramón Gutiérrez Luna Manejo de pastizales
M.C. J. Ricardo Gutiérrez Sánchez Maíz
M.C. Manuel de Jesús Flores Nájera Caprinos
Dr. Miguel Ángel Flores Ortiz Manejo de pastizales
Dr. Joaquín Madero Tamargo Vid
M.C. Guillermo Medina García Potencial productivo
M.C. Enrique Medina Martínez Producción de semillas
Dr. Jaime Mena Covarrubias Entomología
Dr. Francisco Mojarro Dávila Riego y drenaje
M.C. Luis Roberto Reveles Torres Recursos genéticos
Ing. Manuel Reveles Hernández Nopal y Hortalizas
M.C. Francisco Rubio Aguirre Manejo de pastizales
M.C. Salvador Rubio Díaz Fertilidad de suelos
M.C. Agustín Rumayor Rodríguez Frutales caducifolios
Dr. Alfonso Serna Pérez Hidrología
Ing. Román Zandate Hernández Frijol
Dr. Jorge A. Zegbe Domínguez Fisiología vegetal

inifap



SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERIA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACION | SAGARPA

**FUNDACIÓN
PRODUCE**

Zacatecas A.C.