

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA



Calendario de Riego Para el Trigo de la Región de Saltillo, Coahuila Apoyado Con  
Sistemas de Información Geográficos (SIG's)

Por:

**ERNESTO ABELARDO LÓPEZ MALDONADO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

Saltillo, Coahuila, México

Noviembre 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE HORTICULTURA

Calendario de Riego Para el Trigo de la Región de Saltillo, Coahuila Apoyado con  
Sistemas de Información Geográficos (SIG's)

Por:

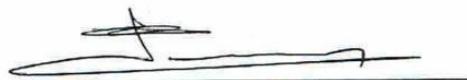
**ERNESTO ABELARDO LÓPEZ MALDONADO**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO EN HORTICULTURA**

Aprobada por el Comité de Asesoría:



M.I.H. Oscar Lemus Ramírez

Asesor Principal



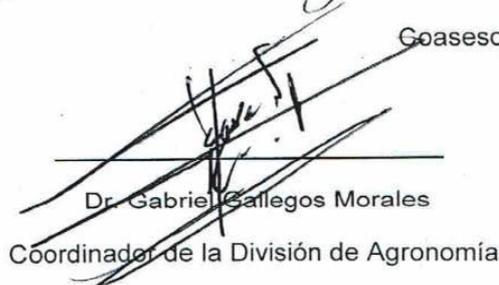
Ing. Gerardo Rodríguez Galindo

Coasesor



MC. Julio Gerardo Charles Cárdenas

Coasesor



Dr. Gabriel Gallegos Morales

Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México

Noviembre 2018

## INDICE

<b>I.- INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>4</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.-</b> .....	<b>5</b>
<b>II.- REVISION DE LITERATURA</b> .....	<b>6</b>
<b>2.7. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.</b> .....	<b>15</b>
Existen muchos SIG´s en el mercado, sin embargo, se considera que los elementos esenciales o subsistemas para operar son: .....	16
<b>2.8. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL SATELITAL Y TELEDETECCIÓN.</b> .....	<b>17</b>
<b>2.9. GEODATOS</b> .....	<b>17</b>
<b>2.10. GEODATOS Y SU REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA.</b> .....	<b>18</b>
<b>2.11. GEOREFERENCIACIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>2.12. GEODATOS Y SUS FORMATOS DIGITALES (MODELOS GEOESPACIALES).</b> .....	<b>18</b>
<b>2.13. FORMATO VECTORIAL.</b> .....	<b>19</b>
<b>2.14. TOPOLOGÍA.</b> .....	<b>19</b>
<b>2.15. LA RESOLUCIÓN DEL ARCHIVO.</b> .....	<b>20</b>
<b>2.16. GEODATOS Y SUS ATRIBUTOS.</b> .....	<b>21</b>
<b>2.17. CALIDAD DE LOS GEODATOS.</b> .....	<b>22</b>
<b>2.18. METADATOS</b> .....	<b>23</b>
<b>2.19. ERIC</b> .....	<b>24</b>
<b>2.20. USO DE SUELO.</b> .....	<b>24</b>
<b>2.21. CARTOGRAFÍA INEGI</b> .....	<b>24</b>
<b>2.22. MODELOS DE SIMULACIÓN</b> .....	<b>25</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>42</b>

## I.- INTRODUCCIÓN

El consumo de agua por las plantas es una función directa, pero no lineal, de la posición geográfica donde esté instalado un cultivo, esto debido a la influencia del viento y la radiación solar que actúan sobre los folios de la planta. Así como por la alteración de los regímenes de saturación de humedad atmosférica.

Adicionalmente el incremento cotidiano de la biomasa, que cambia el índice de área foliar (la razón de la superficie foliar entre la superficie total de la parcela) modifica el aporte de las plantas al vapor de agua atmosférico y varía la contribución de la transpiración con respecto a la evaporación. Este fenómeno conjunto es modelado en lo que se conoce como evapotranspiración potencial del cultivo.

Se supone un comportamiento proporcional al de un pasto sano y con 100% de cobertura foliar, a dicha proporción se le da el nombre de factor cultural y se simboliza con  $K_c$ , el cual es dinámico en el tiempo, la marcha diaria durante el ciclo completo del cultivo, para este factor, es una gráfica de tipo gaussiano. Debe considerarse que dentro del mismo van implícitos las diferencias de altura  $Z$ , de posición  $X$ ,  $Y$ ,  $IAF$  etc. del cultivo de referencia y del cultivo en cuestión. Con respecto al suelo, la variación del contenido de humedad, en función de su textura no es lineal, pero sus valores pueden ser estimados mediante las ecuaciones de Saxton-Rawls o de Rawls-Brakensiek.

La Evapotranspiración de referencia Esto puede ser estimada o medida por diversos métodos directos e indirectos, los más comunes usan la estimación indirecta con la ecuación de Penman-Monteith sugerida por la FAO. Misma que usaremos en el presente trabajo.

### **OBJETIVO GENERAL.-**

Realizar el calendario de trigo para la región de Saltillo, Coahuila

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.-**

- Determinar la evapotranspiración potencial mensual para trigo usando un modelo de simulación biofísico.
- Establecer la capacidad de almacenamiento de agua de un suelo de textura media.
- Realizar el calendario de trigo para la región sureste de Coahuila
- Realizar los mapas de isolíneas de Esto de la región sureste de Coahuila

## II.- REVISION DE LITERATURA

### 2.1. Trigo

Se ha establecido que el origen trigo se encuentra en la región de medio oriente, y de ahí el cultivo se difundió hacia todo el mundo. Pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae), siendo las variedades más cultivadas *Triticum durum* y *T. compactum*. El trigo hexaploide llamado *T. aestivum* es el cereal más cultivado en el mundo por sus características harinables y por ende panificables. La raíz alcanza más de un metro, al ser de tipo fibroso más del 80 % de la masa radicular se encuentra en los primeros 25 cm. de suelo. En condiciones de temporal la densidad de las raíces entre los 30-60 cm. de profundidad es mayor, aunque en regadío el crecimiento de las raíces es mayor como corresponde a un mayor desarrollo de las plantas. El tallo es hueco, con 6 nudos.

Su altura y solidez determinan la resistencia al acame. Las hojas son cintiformes, paralelinerves y terminadas en punta. La inflorescencia es una espiga compuesta de un tallo central de entrenudos cortos, llamado raquis, en cada uno de los cuales se asienta una espiguilla, protegida por dos brácteas más o menos coriáceas o glumas, a ambos lados. Cada espiguilla presenta nueve flores, de las cuales aborta la mayor parte, quedando dos, tres, cuatro y a veces hasta seis flores. Flor: consta de un pistilo y tres estambres. Está protegida por dos brácteas verdes o glumillas, de la cual la exterior se prolonga en una arista en los trigos barbados. Fruto: es una cariopsis con el pericarpio soldado al tegumento seminal. El

endospermo contiene las sustancias de reserva, constituyendo la masa principal del grano. (Infoagro., 2013).

El trigo de invierno se siembra a fines del otoño y debe acumular bajas temperaturas para inducir el ahijamiento o amacoye. En México las fechas recomendadas son a partir de la segunda semana de diciembre y hasta la tercera de febrero. En las zonas más frías se recomienda una fecha intermedia; ya que las muy tempranas exponen la cosecha a las heladas tardías, y las muy tardías, al peligro de las heladas de otoño, o invierno. (Infoagro, 2013).

## **2.2. Contenido de humedad del suelo**

La composición heterogénea del suelo en componentes pero además en tamaños propicia intersticios que permitan el almacenamiento tanto de aire como de agua, la composición granulométrica específica de un suelo determina la cantidad de agua que en determinados momentos puede almacenar un suelo, momentos relacionados a la capacidad de desecación de un suelo específico.

La forma más sencilla de medir el contenido de humedad, sin referirse al estado energético del agua, consiste en estimar la proporción de agua por unidad de suelo, ya sea en peso por unidad de peso, o volumen por unidad

de volumen. La composición aproximada supuesta del suelo es la que se muestra en la figura siguiente:

## Composición hipotética del suelo.

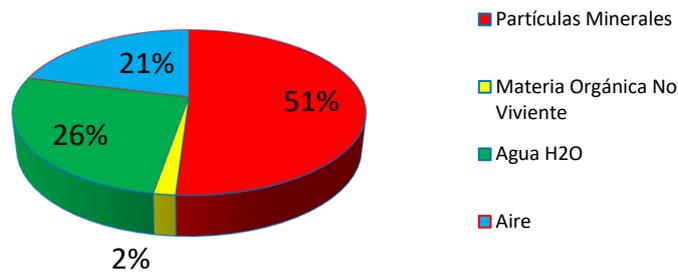


Figura 1. Composición hipotética del suelo

De donde se deduce que el contenido de humedad del suelo se puede estimar de la siguiente manera:

$$\theta = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$\theta$  = Contenido gravimétrico de humedad en porcentaje

$P_w$  = Peso del contenido de humedad

$P_s$  = Peso total del suelo

Mediante la extracción de la humedad en estufa de secado a 110 grados y por diferencia de pesos antes y después de secar, se obtiene el peso del agua, la conversión a porcentaje expresado en volumen por unidad de

volumen, se obtiene después de multiplicar el contenido gravimétrico por la densidad suelo  $\rho$ .

$$\varphi = \theta\rho \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde:

$\varphi$  = Contenido volumétrico de humedad en porciento

$\theta$  = Contenido gravimétrico de humedad en porciento

$\rho$  = densidad aparente del suelo en gr por cm<sup>3</sup>

Como se ha mencionado, el contenido de humedad varía en función de la textura del suelo, y de acuerdo a Zotarelli *et al.* El comportamiento es de la siguiente manera:

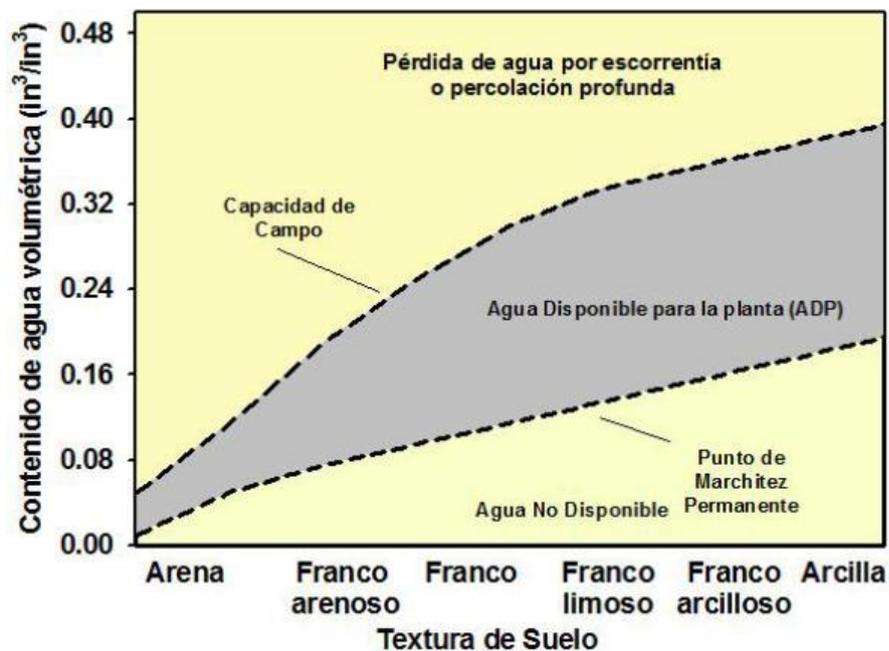


Figura 2. Contenido volumétrico del agua del suelo de acuerdo a la textura del mismo. Zotarelli *et al.*

En ocasiones no están disponibles los laboratorios, o es complicado tener los datos de las llamadas constantes de humedad, una forma alternativa es mediante software de análisis hidrológico como lo es el “Soil Water Characteristics”, mismo que permite calcular la tensión de humedad del suelo, la conductividad y la capacidad de retención de agua en base a las propiedades físicas de la textura, materia orgánica, gravosidad, salinidad y compactación.

Se consideran dos límites de contenido de humedad, el primero lo que se define como la capacidad de campo, y es el agua contenida a una tensión de 33 KPa, de tensión. Coloquialmente es el agua que queda en el suelo después de que se han drenado los excesos y el llamado punto de marchitez permanente, éste a una tensión de 1,500 KPa, ambos son negativos ya que son esfuerzos de presión, sin embargo, la notación que se maneja es como si estos fueran en sentido positivo, salvo que se especifique lo contrario. Los autores Saxton y Rawls (2006), realizaron correlaciones de alrededor de 22,000 suelos para determinar el valor aproximado de acuerdo a la textura, obteniendo las siguientes expresiones:

$$\theta_{v1,500} = \theta_{1,500t} + (0.14X\theta_{1,500t} - 0.02) \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$\begin{aligned} \theta_{1,500t} = & -0.024An + 0.487XArc + 0.006M.O. \\ & + 0.005(An \times M.O) - 0.013(Arc \times M.O) \\ & + 0.068(An \times Arc) - 0.031 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 4.}$$

Donde:

$\theta_{1,500t}$  = Primera estimación de contenido volumétrico a 1500 KPa

$\theta_{v 1,500}$  = Estimación del contenido volumétrico a 1500 KPa

Arc = porcentaje de arcilla en peso %w

An = porcentaje de arena en peso %w

M. O. = Materia Orgánica No Viviente porcentaje en peso %W

$$\theta_{v33} = \theta_{33t} + [(1.283X(\theta_{33t})^2 - 0.374X(\theta_{33t}) - 0.015] \quad \text{Ecuación 5.}$$

$$\begin{aligned} \theta_{33t} = & -0.251XAn + 0.195XArc + 0.011M. O. \\ & + 0.006(An X M. O) - 0.027(Arc X M. O) \\ & + 0.452(An X Arc) - 0.299 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde:

$\theta_{33t}$  = Primera estimación de contenido volumetrico a 33 KPa

$\theta_{v 33}$  = Estimación del contenido volumetrico a 33 KPa

Arc = porcentaje de arcilla en peso %w

An = porcentaje de arena en peso %w

M. O. = Materia Orgánica No Viviente porcentaje en peso %W

### 2.3. La evapotranspiración

El fenómeno conjunto de la evaporación y la transpiración se le conoce como evapotranspiración y se puede conceptualizar como la cantidad de humedad que suelo y planta, liberan al medio para equilibrar el déficit de saturación de vapor de agua, lo anterior debido al efecto de la temperatura, radiación y viento incidente sobre una localización geográfica puntual.

La fracción aportante de la planta varía en función del cambio del dosel y en la etapa inicial toda la humedad es aportada por el suelo hasta que el

índice de área foliar (IAF) es máximo, entonces, el aporte es casi en su totalidad por la planta como se muestra en el gráfico siguiente:

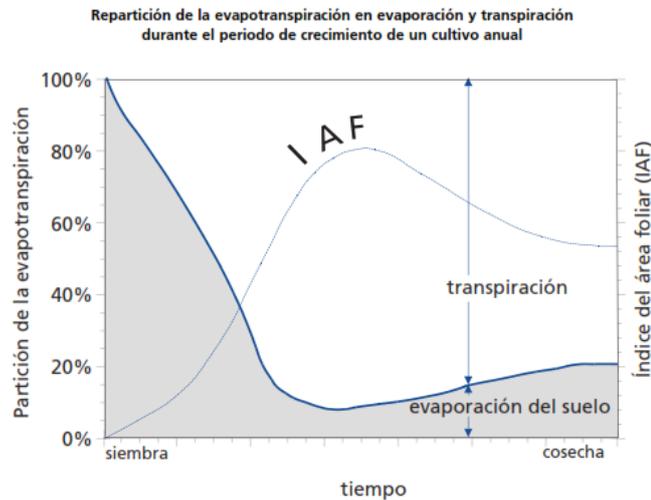


Figura 3. Aportación de humedad de suelo y planta durante todo el ciclo. Manual 56, FAO, 2006.

## 2.4. Unidades

Las unidades utilizadas para representar la evapotranspiración son mm por unidad de tiempo (mm/día), las cuales representan la cantidad de agua, en forma de vapor, liberada al medio por unidad de tiempo, adicionalmente se puede representar en forma de energía por unidad de área en Mega Joule por metro ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) la cual es la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua al ambiente, más específicamente es el calor latente de vaporización, mismo que es de 2.45 MJ por milímetro, entonces se puede deducir que un milímetro es equivalente a  $2.45 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$

## 2.5. ETo y ETc

Existen diversos métodos directos e indirectos para estimar la evapotranspiración, la mayoría de los métodos son indirectos por su sencillez y economía, los cuales precisan información meteorológica para el cálculo. La FAO ha sugerido el método indirecto con la ecuación de Penman y Monteith como forma de estandarizar una técnica debido a la amplia proliferación de métodos para hacer la estimación.

La recomendación la hace bajo las siguientes consideraciones de medición: sobre un pasto de 12 cm de altura, completamente cubierto (IAF igual a 100%), sin problemas de riego y en estado fitosanitario óptimo. La ecuación modificada comprende una parte radiativa y una parte aerodinámica que se expresa de la siguiente forma:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde:

$ET_o$	evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ )
$R_n$	radiación neta en la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
$R_a$	radiación extraterrestre ( $\text{mm día}^{-1}$ )
$G$	flujo del calor de suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ )
$T$	temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ )
$u_2$	velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ )
$e_s$	presión de vapor de saturación (kPa)
$e_a$	presión real de vapor (kPa)
$e_s - e_a$	déficit de presión de vapor (kPa)
$\Delta$	pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )
$\gamma$	constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

De lo anterior, se obtiene un valor de ET que se conoce como el de la referencia  $ET_o$  y debido a que el IAF de un cultivo cualquiera será una proporción, o en el mejor de los casos, igual al del cultivo de referencia, podemos establecer un ET del cultivo ( $ET_c$ ) que se relaciona de la siguiente manera:

$$ET_c = K_c * ET_o \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde:

$ET_o = \text{Evapotranspiración de referencia}$

$ET_c = \text{Evapotranspiración del cultivo}$

$K_c = \text{factor cultural particular del cultivo}$

## 2.6. Balance hídrico

A la diferencia aritmética entre la capacidad de campo de un suelo y el punto de marchitez permanente se le conoce como humedad total aprovechable (HTA), bajo el supuesto de que es la humedad a la que tendría acceso una planta, sin embargo, es sabido, que no es adecuado someterla a bajos contenidos de humedad ya que sufre estrés y redundante en una reducción del rendimiento. Por esa razón se introduce un factor semi-arbitrario conocido como factor de abatimiento, mismo que es fijado de acuerdo a cada cultivo, y el producto se conoce como humedad fácilmente aprovechable (HFA), por último, se incluye la profundidad de la raíces para darle unidades y en caso de que los contenidos de humedad sean gravimétricos estos se multiplican por la densidad aparente del suelo.

Se debe de introducir una constante para darle congruencia a las unidades, con lo que obtenemos la lámina de agua contenida en el suelo. Quedando una expresión como se muestra a continuación:

$$\text{Lamina de agua del suelo} = (CC - pmp)f * Pr \quad \text{Ecuación 9.}$$

Donde:

*CC = Capacidad de campo. % de agua en Vol*

*Pmp = Punto de marchitez permanente . % de agua en Vol*

*f = fracción o abatimiento permisible para no estresar a la planta %*

*Pr = Pr ofundidad de raices en m*

## **2.7. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

Un sistema de información geográfica (SIG) es considerado un gestor de geodatos, herramientas y procedimientos particulares con la finalidad de ayudar en el proceso de toma de decisiones en ambientes de trabajo multidisciplinarios (Fallas 2011).

En un SIG, a nivel general y sobre la base de que cada objeto ocupa un solo lugar a la vez en el espacio tiempo, a cada ente o elemento del mundo real se le define por su posición geográfica instantánea y por sus características o atributos aplicables en ese momento. Un ejemplo, de ello, es una parcela con cultivo, la cual poseé coordenadas (ongitud y latitud) y una altura sobre el nivel del mar, los primeros definen su perímetro, adicionalmente

se le acompaña con una tabla de atributos que describe las características entre las cuales se encuentran el tipo de cultivo, área, estado fenológico y eventualmente gráficos o fotos del sitio. Sobre esa base los tomadores de decisiones en diferentes instituciones y localidades pueden acceder y analizar una situación particular desde diferentes puntos de vista, utilizando las funciones y operaciones del SIG. Una ventaja del SIG es que elimina ambigüedades en cuanto a aspectos tales como ubicación y características del objeto o tema analizado (Fallas, 2011).

Esta nueva geotecnología evolucionó a partir del desarrollo propio e integración de otras tecnologías y disciplinas mismas que van desde el diseño asistido por computadora o CAD (por sus siglas en inglés) la teledetección y telemetría, las bases de datos y hasta la cartografía digital.

Por esa razón a los SIG's se les considera primordialmente gestores de bases de datos más que software de pre proceso o pos proceso de cartografía digital, los cuales integran elementos de las tecnologías que se mencionan.

Existen muchos SIG's en el mercado, sin embargo, se considera que los elementos esenciales o subsistemas para operar son:

1. Equipo de cómputo y sus periféricos,
2. Soporte lógico (programas),
3. Geodatos,
4. Usuarios(as), incluye operadores del software

5. Técnicas y métodos de análisis y
6. El ambiente organizacional.

## **2.8. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL SATELITAL Y TELEDETECCIÓN.**

Aunado a los SIG's otras tecnologías que se utilizan son el Sistema Global de Posicionamiento Geográfico (GPS por sus siglas en inglés) que permite la ubicación precisa, de personas u objetos a nivel del globo terráqueo y con error menor a 50 cm, dependiendo del aparato usado. La segunda es la teledetección la cual posibilita la obtención de imágenes de alta resolución espacial, espectral y temporal mediante satélites y sensores aerotransportados, imágenes que captan gran parte del espectro electromagnético, en zonas de longitud de onda, donde el ojo humano es incapaz de alcanzar (Araiza, 2012).

## **2.9. GEODATOS**

La definición de un geodato se refiere a cualquier objeto físico que por sus características propias, espacio temporales, precisa de su ubicación geográfica, ya sea de manera explícita o implícita. El procedimiento mediante el cual se le asigna una posición fija o ubicación a un objeto se le denomina georreferenciación. A diferencia de un dato común el geodato posee coordenadas geográficas o de un sistema proyectado. Los geodatos posibilitan la ubicación física de objetos o fenómenos con características

particulares y en ocasiones de variables compuestas: ejemplos de objetos físicos son carreteras y brechas, zonas boscosas y de variables compuestas serían: de patrón de propagación de la gripe común, tasa de natalidad por regiones (Araiza, 2012).

## **2.10. GEODATOS Y SU REPRESENTACIÓN GEOMÉTRICA.**

Los objetos del mundo físico son en ocasiones de forma indefinida, compleja y tamaño variable para representarlos en los mapas y digitalmente, es necesario simplificarlos. Por esta razón se ha hecho necesario estandarizar su representación en mapas impresos y digitales utilizando puntos, líneas, polígonos, colores, tramados y texto para representar los elementos de la realidad (Araiza, 2012).

## **2.11. GEOREFERENCIACIÓN.**

La georreferenciación se define como el proceso matemático-digital utilizado para relacionar la posición topográfica de un objeto dentro de un mapa (impreso o digital) de acuerdo a su posición en la superficie de la Tierra.

## **2.12. GEODATOS Y SUS FORMATOS DIGITALES (MODELOS GEOESPACIALES).**

En un SIG los elementos del mundo físico deben representarse en coordenadas (X, Y, Z) usando una referencia geográfica o una proyección.

Los mapas contienen tres elementos: puntos, líneas y polígonos; los cuales se almacenan en el SIG utilizando archivos tipo vector y tipo raster.

### **2.13. FORMATO VECTORIAL.**

El elemento fundamental o básico es el punto, el cual está formado por un par de coordenadas X, Y. A partir de ellos se crean las líneas, polilíneas y polígonos, la parte complementaria de un lienzo (canvas), se encuentra hueco, lo que redundaría en menor cantidad de memoria física del computador y menor espacio de disco duro; sin embargo no posee atributos espaciales; la cual expresa las relaciones entre los diferentes elementos gráficos y su posición en el mapa como proximidad, inclusión, conectividad y vecindad.

### **2.14. TOPOLOGÍA.**

La acepción de topología en este contexto se refiere a las relaciones espaciales de conexión y adyacencia entre elementos geográficos en un tema o capa de geodatos. Las relaciones topológicas se construyen de elementos simples a elementos complejos: puntos (elementos más simples), arcos (conjunto de puntos conectados), áreas (conjunto de arcos conectados) y rutas (conjuntos de secciones conformadas por arcos o porciones de arcos). La topología permite utilizar el software de SIG para ejecutar operaciones geoespaciales sin utilizar coordenadas geográficas. La topología tiene cuatro componentes básicos (de Smith et al. 2009,):

- Dimensionalidad: es la dimensión en el sentido euclidiano y la diferencia entre punto, línea, área y volumen, los cuales tienen dimensiones geométricas de 0, 1, 2 y 3, respectivamente.
- Conectividad (Topología Arco–Nodo): es la unión entre arcos en los nodos. Los puntos finales de un arco se denominan nodos
- Definición de área/contenido (Polígono–Topología Arco): Los polígonos son representados como una serie de pares ordenados x, y que se conectan para definir un área.
- Contigüidad: Todo arco tiene una dirección. El software de SIG mantiene una lista de los polígonos ubicados a la derecha e izquierda asociados a ellos; sin embargo no posee topología; la cual expresa las relaciones espaciales entre los diferentes elementos gráficos y su posición en el mapa (e.g. proximidad, inclusión, conectividad y vecindad).

## **2.15. LA RESOLUCIÓN DEL ARCHIVO.**

La resolución del archivo está en función de las dimensiones de la celda (largo\*ancho). Cuanto menor sea dicha dimensión mayor será la resolución y por ende mayor la precisión geométrica de la base de datos.

Los formatos raster son particulares de cada compañía proveedora de software, sin embargo, existe un archivo de intercambio denominado ASCII (American Standard Code for Information Interchange), el cual puede ser leído en todos los programas de SIG. A los archivos raster también se les denomina mapa de bits, imagen matricial o mapa de píxeles (Araiza, 2012).

A la transferencia de información de un formato raster a uno vectorial se le denomina vectorización y el proceso inverso se denomina rasterización ambos pueden ser realizados por SIG's aunque no necesariamente.

Las imágenes son archivos raster utilizados para almacenar imágenes de satélite, fotos aéreas digitales y mapas/fotos escaneadas uno de los formatos más usado es el de TIF (Tagged Information File) y la extensión a GeoTif se refiere a un archivo gráfico con georeferencia. Algunos de los formatos de uso común en la actualidad son TIF, GeoTif, JPG, JPG2000, IMG de ERDAS, entre otros (Araiza, 2012).

## **2.16. GEODATOS Y SUS ATRIBUTOS.**

Las tablas son datos tabulares asociados a las capas de geodatos. Cada tabla está relacionada a un grupo homogéneo o no de elementos de geográficos tales como edificios, zonas de cultivo, colonias, establecimientos comerciales carreteras, ríos, curvas de nivel, etc.) Y son bases de datos de un número variable de filas e hileras. Cada fila, llamada registro, contiene una descripción de una característica y cada columna campo o atributo almacena

una característica específica. Las características de los elementos geográficos son generalmente expresadas como valores numéricos o alfabéticos antes de digitarlos en la tabla correspondiente. Las tablas y bases de datos se utilizan para almacenar las características, propiedades o atributos de los elementos geométricos (puntos, líneas, áreas y píxeles). Los formatos más comunes son tablas simples como las de Excel y Dbase; archivos ASCII, CSV (Valores separados por coma) y diversos formatos de bases de datos relacionales susceptibles de ser consultados bajo el standard SQL de tales como Oracle, MySQL, SQL Server, PostgreSQL, IBM DB2, SQLite y Microsoft Access (Fallas, 2011).

## **2.17. CALIDAD DE LOS GEODATOS.**

La evolución tecnológica ha redundado en mayor calidad de métodos y herramientas para crear, analizar y divulgar geodatos. Un efecto subyacente de dichos adelantos es que con frecuencia se transmite la idea de que los datos están libres de errores y que los productos son “perfectos”. Sin embargo, no es así demostrado. Todo geodato utilizado en un software de SIG poseen errores y por ende los productos creados a partir de ellos heredarán dichos errores, los cuales son acumulativos y con una media geométrica ponderada, las fuentes de error pueden ser:

- Datos desactualizados: esto es particularmente cierto en estudios multiespaciales que no consideran la variabilidad temporal.

- Calidad de material cartográfico: las fuentes de datos deben de ser homogéneas en espacio tiempo, dicho de otra manera la escala de los datos fuente debe ser homogénea, ya que aunque se demuestren estos, cuando tengan escala diferente, el error se propaga.
- Datos incorrectos: esto toma relevancia cuando la fuente de datos ya es mayor a diez años. Los geodatos contenidos tendrán una incertidumbre mucho mayor o simple y sencillamente ya no existen físicamente, además de los que por error han sido incluidos en la cartografía base.
- Ausencia de buenas prácticas de trabajo: En ocasiones los técnicos además de no establecer normas y buenas prácticas de trabajo, no realizan a conciencia su trabajo, lo que repercute en datos incompletos o inexactos. Adicionalmente es recomendable designar a un solo encargado de digitalizar geodatos, ya que de esta manera tendrán mayor homogeneidad

## **2.18. METADATOS**

Los metadatos son datos que contienen otras bases de datos. El metadato describe el contenido, calidad, condición y otras características de los geodatos. Siempre hay que registrar el origen de los metadatos el sistema de referencia que incluya proyección, datum vertical y horizontal; contenido y estructura fecha de adquisición y publicación así como la calidad de los datos.

## **2.19. ERIC**

El instituto mexicano de tecnología del agua desarrolló: El Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III; 2006), ya que debido a convenios internacionales, la base de datos climáticas del país se encuentra en formato binario en la base de datos CLICOM. La información contenida se refiere a todas las estaciones meteorológicas del país, la cual data de distintas fechas, en algunas tan anterior como de principios del 1900 y otra desde 1985, ambas con terminación a alrededor de 1995. Las variables base que contiene son, Precipitación, Temperatura, Granizo, Nubosidad, Tormenta eléctrica, entre otras.

## **2.20. USO DE SUELO.**

Dentro de las coberturas importantes necesarias para estimar consumo de agua se encuentra la de: uso de suelo, ésta por sí sola no es posible obtenerla, pero es posible producirla, mediante el inventario nacional forestal realizado por el Instituto de Geografía de la UNAM, la escala es 1:50000 y se realizó en el año 2006.

## **2.21. CARTOGRAFÍA INEGI.**

El Instituto nacional de estadística Geografía e Informática, posee un continuo de elevación a nivel nacional para obtener los modelos digitales de elevación, en una escala 1:50000, los cuales son 1 representación digital de

las alturas del terreno en forma tridimensional, mismas que son obtenidas a partir de las curvas de nivel de las Cartas Topográficas o por métodos fotogramétricos. Consiste en un registro de las elevaciones sobre el nivel del mar, calculadas a intervalos regulares. Permite la observación y análisis de las altitudes y características morfológicas del territorio, por lo que resulta muy útil en los trabajos donde la elevación y pendiente del terreno son factores indispensables a considerar: estudios de impacto ambiental, evaluación de riesgos, arquitectura del paisaje, investigación y educación, entre otros. Son archivos tipo Band Inter Leaved \*.BIL, en proyección geográfica. Adicionalmente disponible en escala 1:50 000 coincidiendo con el cubrimiento y clave de hoja en cada escala, en proyección UTM. INEGI (2012)

## **2.22. MODELOS DE SIMULACIÓN.**

Los modelos hidrológicos se clasifican en dos grandes vertientes, los primeros son los globales, los cuales parten del supuesto de la cuenca como una sola entidad homogénea, con una única entrada de lluvia, donde la estimación del gasto de salida se hace a partir de una dinámica global del sistema. sobre la base del concepto del hidrograma unitario HU, la cual asume la cuenca como un sistema cuasi lineal, casuístico y constante en el tiempo, dónde una parte porcentual de la precipitación de lluvia efectiva produce escurrimiento, solo afectada por los procesos de lluvia interceptada evaporación, e infiltración considerados dentro del balance.

La conceptualización puede considerarse gruesa, un poco burda, y con bases físicas poco explícitas, sin embargo, puede servir como base, para obtener una primera aproximación dentro de los procesos de balance hídrico.

Con la finalidad de mayor precisión, se puede plantear un problema inverso, la incógnita del Balance, partiendo de información textural e hídrica disponible de los sitios de interés (con datos de lluvia y gasto de estaciones meteorológicas e hidrométricas), obstaculizado solo por el hecho de que los datos no siempre están disponibles en cantidad y calidad.

Con el objetivo de hacer los modelos más explícitos y sobre una física más apegada a los fenómenos, se han desarrollado modelos agregados. Los cuales están constituidos por subsistemas secuenciales de elementos conceptuales interconectados y que representan la respuesta particular en espacio y tiempo de los componentes del balance hidrológico (evaporación, infiltración en medio saturado, distribución espacial), lo cual trae aparejado el incremento de parámetros, sin embargo, los subsistemas distan de modelar, por completo, la totalidad de los fenómenos involucrados.

Los modelos considerados distribuidos consideran la variabilidad espacial de las diferentes incógnitas y parámetros y reproducen más fielmente los procesos que tienen lugar dentro del sitio de interés. Estos últimos modelos con base física modelan los procesos del balance hídrico de la parcela o sitio de interés, los que consideran las ecuaciones características de los diferentes procesos, integrando las salidas de los diferentes procesos de cada celda o

capa de suelo, con las vecinas. Lo que produce modelos muy complejos que precisan una gran cantidad de datos de entrada, con la consecuente dificultad en la calibración de un número extenso de parámetros.

Actualmente se pueden encontrar soluciones intermedias entre ambos tipos de modelos. Los modelos de parámetros distribuidos, los cuales dividen a la parcela en zonas menores más homogéneas, dónde se aplica un modelo global. La respuesta global de los sitios la cuenca se compone a partir de la aportación de las diferentes subunidades.

### III Materiales y Métodos

El trabajo se llevó a cabo en la región sureste de Coahuila, con coordenadas extremas 24.54° de latitud norte 100.25° de longitud Oeste, y hasta 26.29° de latitud norte 102.67° de longitud Oeste con alturas desde los 700 metros y hasta los 2200 metros sobre el nivel medio del mar. Se utilizó una computadora personal con procesador core i5, de 4 gb de ram y 1 terabyte de disco duro. El suelo tipo, usado corresponde a un suelo medio, con un 1.8 % de Materia Orgánica No Viviente, sin gravosidad, sin reducción de densidad (compactación) y una conductividad eléctrica de 2 dSm.

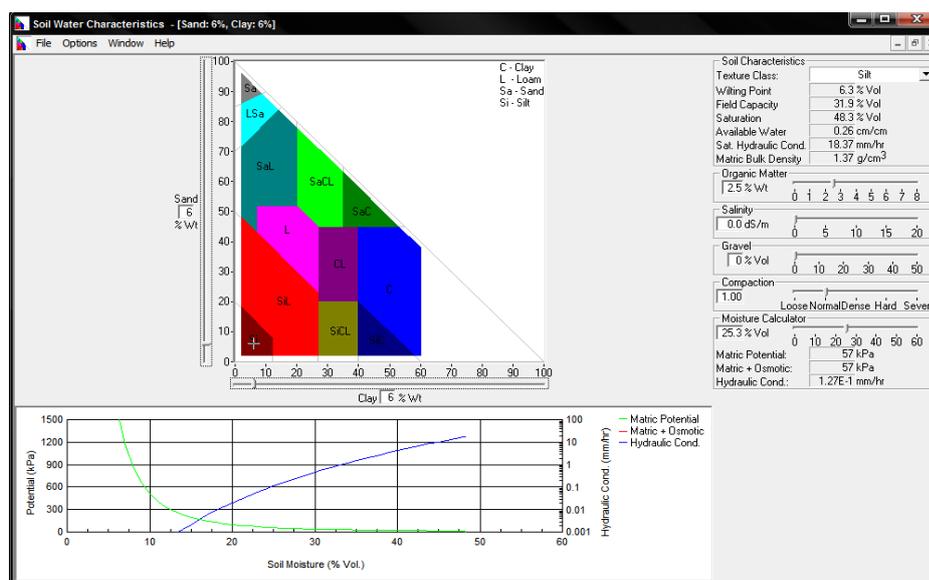


Figura 4. Constantes de humedad para un suelo medio, mediante Soil Water Characterystics desarrollado por Saxton alimentado con los modelos de Saxton-Rawls; 2006

Se utilizó el programa de Soil Water Characterystics, desarrollado por Saxton y el cual incluye los modelos de Saxton y Rawls (2006), para la

estimación de las constantes de humedad del suelo con las características ya mencionadas.

Para el cálculo de la ETo se usó el programa CropWat 8 for Windows, desarrollado por la FAO 2011. Usa un método indirecto para la estimación del consumo de agua, sobre la base de la ecuación de Penman y Monteith modificada; se precisan los datos meteorológicos para tal estimación.

Los datos meteorológicos corresponden a las estaciones

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas utilizadas.

OBJECT-ID	NOMBRE	MUNICIPIO	Latitud	Longitud	Altitud
1	ALTO DE NORIAS	RAMOS ARIZPE	25.9728333	-101.242667	980
2	ARTEAGA (DGE)	ARTEAGA	25.4333333	-100.85	1720
3	ARTEAGA (SMN)	ARTEAGA	25.4405	-100.834	1660
4	BAJAN	CASTAÑOS	26.5255	-101.255333	900
5	BAJIO DE AHUICHILA	VIESCA	25.1096667	-102.626	1300
6	C.E.F.Z.A. LA SAUCEDA	RAMOS ARIZPE	25.85	-101.316667	1100
7	CARNEROS	SALTILLO	25.1181667	-101.106667	2100
8	CASTAÑOS (DGE)	CASTAÑOS	26.7705	-101.4095	743
9	CIENEGA DE LA PURISIMA	ARTEAGA	25.3361667	-100.524833	2420
10	CONCORDIA	SAN PEDRO	25.7833333	-100.116667	1105
11	CUATRO CIENEGAS (DGE)	CUATRO CIENEGAS	26.9666667	-102.066667	750
12	CUATRO CIENEGAS (SMN)	CUATRO CIENEGAS	26.9833333	-102.066667	740
13	DOS DE ABRIL	GENERAL CEPEDA	25.3588333	-101.5735	1550
14	E.T.A. 010 DERRAMADERO	SALTILLO	25.2666667	-101.25	1750
15	EJIDO REATA	RAMOS ARIZPE	26.1235	-101.0725	936
16	EL MARQUEZ	CASTAÑOS	26.6381667	-101.355	860
17	EL SOL	PARRAS	25.6203333	-102.62	1109
18	EL TANQUITO	CASTAÑOS	26.6195	-101.3075	920
19	EL TUNAL	ARTEAGA	25.4506667	-100.873	1670
20	EMILIANO ZAPATA	VIESCA	25.487	-102.938833	1110
21	ESTANQUE DE LEON	CUATRO CIENEGAS	26.9341667	-102.204333	1350
22	GENERAL CEPEDA	GENERAL CEPEDA	25.3765	-101.472	1400
23	GOMEZ FARIAS	SALTILLO	24.9583333	-101.024833	1920
24	HIPOLITO	RAMOS ARIZPE	25.6923333	-101.402833	1150
25	HUACHICHIL	ARTEAGA	25.2048333	-100.8245	2100

26	JAME	ARTEAGA	25.3666667	-100.616667	2769
27	LA ROSA	GENERAL CEPEDA	25.5176667	-101.385	1230
28	LA VENTANA	VIESCA	25.3333333	-103.25	1211
29	LA VENTURA	SALTILLO	24.6361667	-100.887167	1740
30	LAS HORMIGAS	SALTILLO	24.9561667	-100.856333	2110
31	LAS MORENAS	CUATRO CIENEGAS	26.9368333	-102.2205	836
32	PARRAS	PARRAS	25.4363333	-102.170333	1500
33	POTRERO DE ABREGO	ARTEAGA	25.284	-100.339	1740
34	PRESA DE GUADALUPE	SAN PEDRO	25.7553333	-103.052167	1110
35	RAMOS ARIZPE (DGE)	RAMOS ARIZPE	25.5368333	-100.9505	1400
36	RAMOS ARIZPE (SMN)	RAMOS ARIZPE	25.5333333	-100.983333	1430
37	SALTILLO (DGE)	SALTILLO	25.4166667	-101	1589
38	SAN ANTONIO LAS ALAZANAS (DGE)	ARTEAGA	25.2666667	-100.616667	2170
39	SAN ANTONIO LAS ALAZANAS (SMN)	ARTEAGA	25.2833333	-100.616667	2300
40	SAN FRANCISCO DEL VALLE	CUATRO CIENEGAS	26.8231667	-102.721667	900
41	SAN JUAN DE LA VAQUERIA	SALTILLO	25.2528333	-101.218667	1760
42	SAN PEDRO	SAN PEDRO	25.7543333	-102.990667	1100
43	SAN VICENTE	PARRAS	25.6166667	-102.216667	1170
44	SANTA TERESA	CASTAÑOS	26.389	-101.352	1010
45	SANTA TERESA DE SOFIA	CUATRO CIENEGAS	26.608	-102.272667	800
46	TANQUE AGUILEREÑO	VIESCA	24.8088333	-102.95	1460
47	TEJABAN DE LA ROSITA	VIESCA	25.2718333	-103.203833	1200
48	VIESCA (DGE)	VIESCA	25.3178333	-102.804833	1100
49	VIESCA (SMN)	VIESCA	25.35	-102.8	1093
50	GALEANA	GALEANA	24.806667	-100.0715	1644
51	CAOPAS	MAZAPIL	24.4756667	-102.171667	1986

Para llevar a la representación cartográfica se usó el Arc-Gis 10.1 y módulos, “Spatial Analyst”, “3D Analyst”, “Tracking Analyst”, “Geoestadistical Analyst”

El modelo de elevación digital usado fue el elaborado a partir del vuelo Aster 2 con una resolución de 30 X 30 metros y a un grado por mosaico. El tratamiento inicial fue sin proyección en geográficas decimales y con el

sistema geodésico mundial de 1984 (WGS84). Posteriormente se usó la proyección Conforme Cónica de Lambert con ITRF1992, como se muestra a continuación

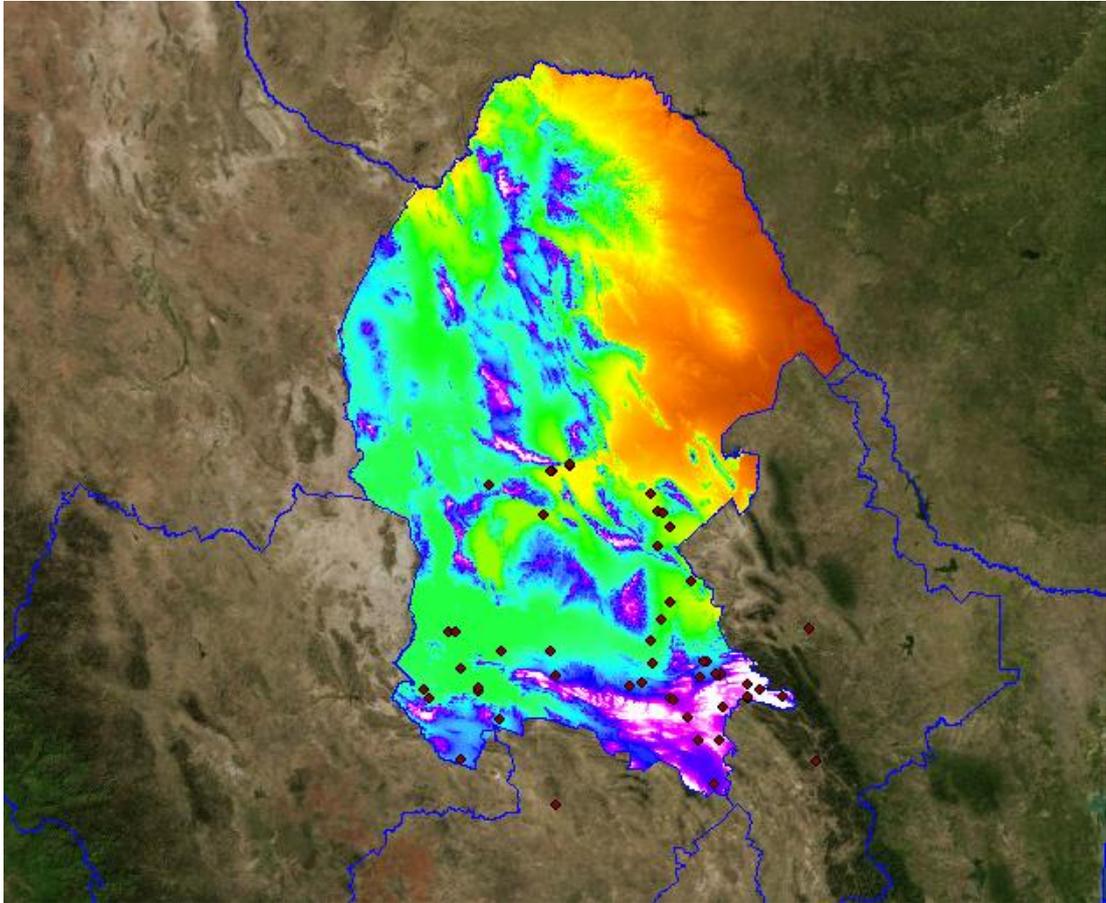


Figura 5. Modelo de elevación digital del estado de Coahuila sobre imagen de satélite LandSat 7 ETM+, así mismo vector de la división política de la República Mexicana

En la figura 5. Está ilustrada también la división política estatal con las mismas características de proyección. Ambos se superpusieron en una imagen LandSat 7, compuesta en color verdadero usando las bandas 1, 2, 3; el barrido de la escena es de 183 km X 170 km, con una resolución de 30X30 m. en pixel . La composición se realizó en ENVI 5.

Los datos meteorológicos usados fueron los de la base de datos de CLICOM usando el extractor rápido de información climáticas (ERIC).

Para el manejo de los datos, se creó en Excel una tabla dinámica y estática en la cual se introdujeron las temperaturas extremas promedio diarias, la precipitación, la humedad relativa, la insolación y la velocidad del viento en km/día. Todas las variables en promedio mensual para los 12 meses del año, creando años tipo, para cada una de las estaciones,

Debido a que la base de datos del servicio meteorológico nacional (CLICOM), no considera los valores de humedad relativa y velocidad del viento, los primeros fueron tomados del observatorio meteorológico local, los segundos se obtuvieron de los mapas elaborados por Capel Molina (1986)-

Se creó una gran hoja de cálculo de Excel para ubicar con sus valores de referencia geográfica, los valores de los datos meteorológicos de cada una de las estaciones.

Para cada una de las estaciones y con los datos de año tipo, se estimaron los datos de la ETo en un software el cual utiliza el método de Penman y Monteith, los valores de ETo, los reporta para cada decena de días y con los valores de ETo y del factor cultural Kc se obtiene el valor de la

evapotranspiración potencial del cultivo en el periodo mencionado, dichos valores son acumulados para obtener el total durante el ciclo de cultivo.

Los valores de las variables se exportaron a un formato compatible separado por comas para su inserción en el SIG.

Con los datos de la ETp del cultivo georeferenciados de acuerdo a la ubicación geográfica de la estación, valores puntuales, se pudo realizar una interpolación. Interpolación mediante el método de Krigging y usando un semivariograma esférico. Producto de este proceso se obtuvieron 13 mapas de líneas equipotenciales de evapotranspiración o isolíneas de ETp uno por cada decena de días.

El método para definir la región sureste fue agregar los vectores de los municipios de Arteaga, General Cepeda, Saltillo, Ramos Arizpe y Parras, de donde se obtuvo el total del área, como se muestra en la figura 6.

Adicionalmente se trataron los datos tabulares para obtener la ETo promedio total del cultivo, con media aritmética simple, del año tipo del total de las estaciones

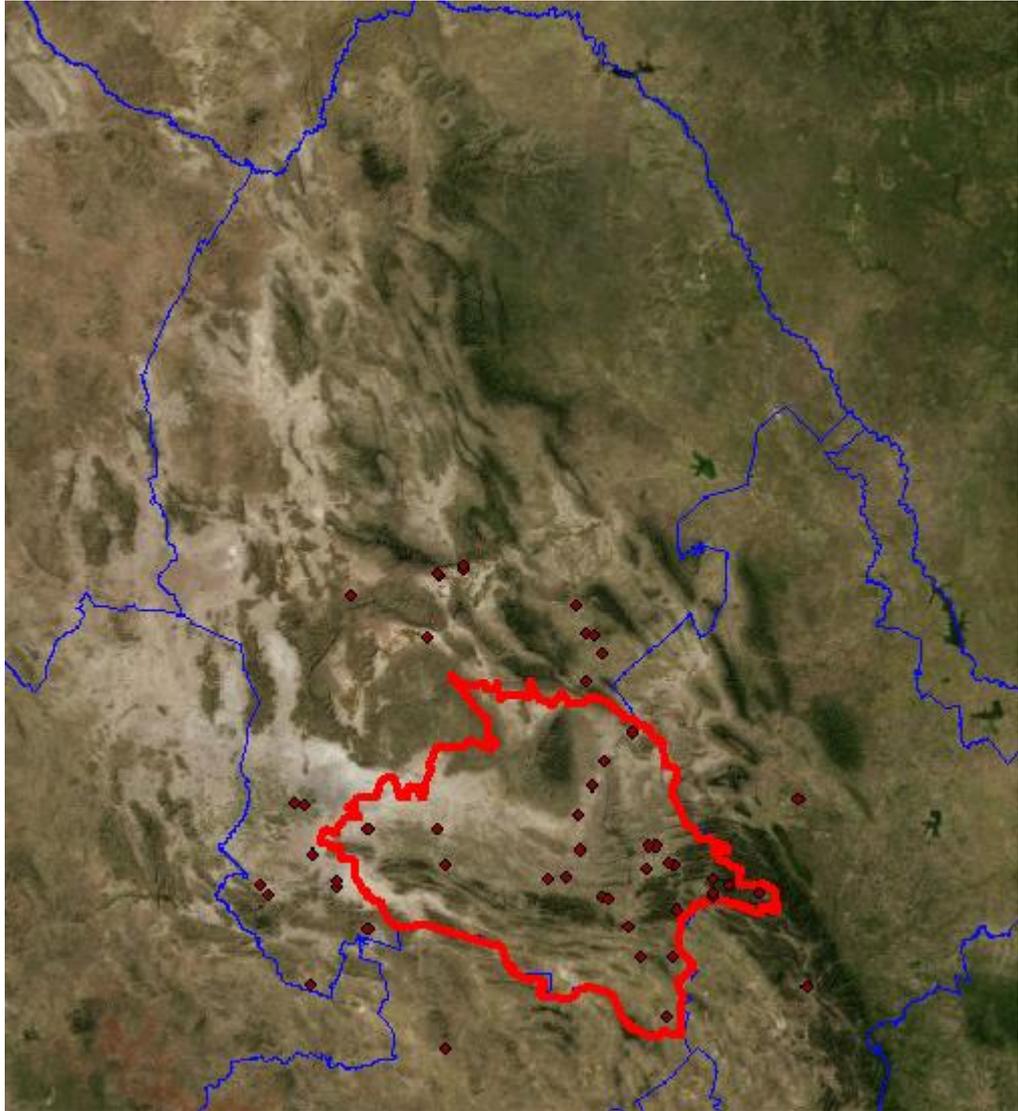


Figura 6. Vector de la región sureste de Coahuila, en el mismo mapa se puede observar la ubicación de las 51 estaciones meteorológicas usadas para la estimación del mapa de isolíneas.

El vector resultante sería usado como máscara para extraer el mapa de las isolíneas correspondiente a la región usando como fondo el modelo de elevación digital del estado de Coahuila, adicionalmente se utilizó la composición de imágenes de satélite en color verdadero, junto con el vector de la división política de las entidades federativas del país, para tener mayores referencias visuales.

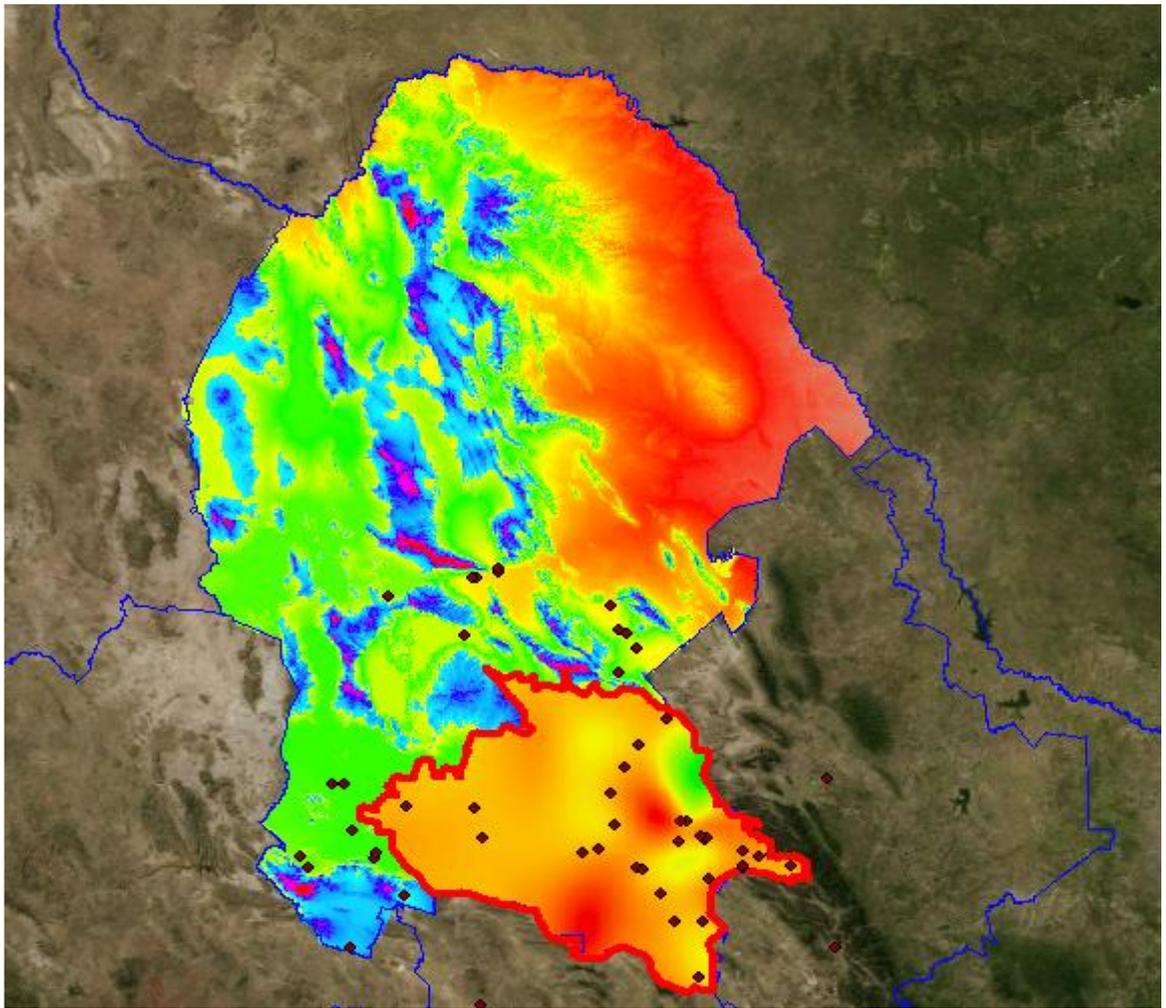


Figura 7. Mapa de isolíneas de la ETo promedio para el ciclo del trigo de invierno en la región sureste de Coahuila.

## IV RESULTADOS Y DISCUSION

En el cuadro 2. Se muestran los datos de temperatura, precipitación viento y humedad relativa usados para la estimación de la Evapotranspiración de referencia. Los datos necesarios son las temperaturas extremas diarias promedio mensual, la humedad relativa, así como la velocidad del viento en kilómetros por día. Las horas luz o insolación mediante la cual se puede estimar la radiación neta expresada en MegaJouls  $m^{-2}día^{-1}$ , Con esto podemos calcular la ETo en mm/día promedio mensual

Cuadro 2. Cálculo de la ETO para un año tipo, en la región sureste de Coahuila, mediante Penman Mionteith, CropWat FAO 2011.

Mes	Temp Min	Temp Max	Humedad	Viento	Insolación	Rad	ETo
	°C	°C	%	km/día	horas	MJ/m <sup>2</sup> /día	mm/día
Enero	-8	37	45	120	10.1	17.2	4.14
Febrero	-5	40	62	72	10.8	20.4	4.17
Marzo	-3	40	40	96	11.1	23.7	5.38
Abril	1	39	45	96	11.7	26.7	5.95
Mayo	2	42	37	120	12.3	28.4	7.08
Junio	3	43	55	44	12.8	29.2	6.17
Julio	4	44	70	120	13.4	30	7.49
Agosto	7	42	72	96	13.2	29	6.79
Septiembre	1	42	80	72	12.8	26.7	5.9
Octubre	0	42	70	72	12.4	23.2	4.97
Noviembre	-3	40	68	96	11.7	19.5	4.29
Diciembre	-4	37	55	120	10.6	16.9	3.97
Promedio	-0.4	40.7	58	94	11.9	24.2	5.52

Los datos obtenidos para un suelo medio se muestran a continuación en el cuadro 3.

Cuadro 3. Constantes de humedad para un suelo de textura media

Tipo de suelo	Medio	Unidades
Humedad total aprovechable	290	mm/m
Tasa de infiltración	40	mm/día
Prof radicular máxima	900	Cm
Abatimiento inicial	0	%
Humedad inicial disponible	290	mm/m

La humedad total aprovechable es de 290 mm por metro lo cual es alto, sin embargo se debe de tomar en consideración que solo alrededor del 50% de ese total cae dentro de la humedad fácilmente aprovechable.

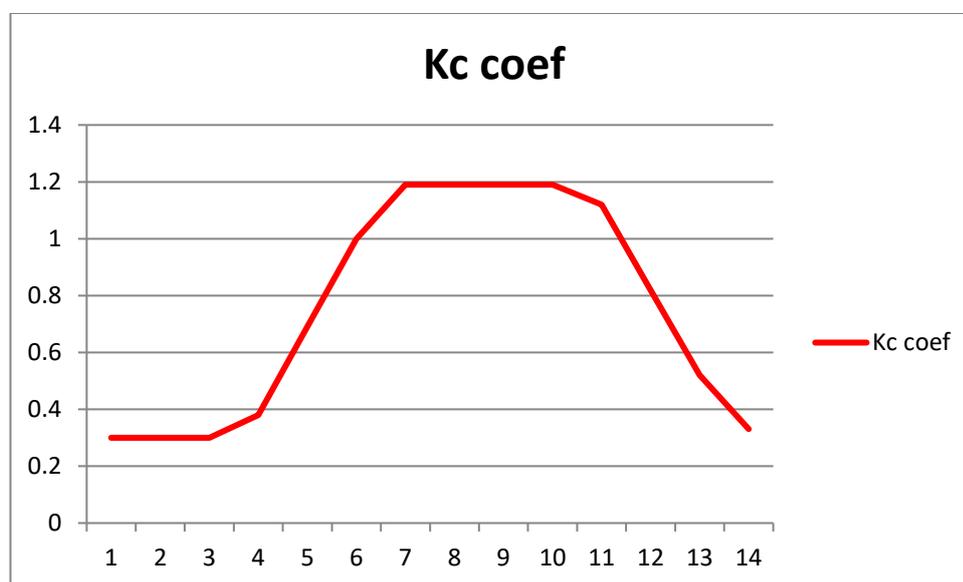


Figura 8. Comportamiento del Factor cultura Kc durante el ciclo de cultivo del trigo de invierno.

En la figura 8. Se muestra el comportamiento del factor cultural en función de la variación temporal del dosel del cultivo en cuestión y se puede apreciar que sigue una marcha muy similar a la acumulación de la biomasa.

Para estimar la lluvia proporcional que ayuda a las funciones fisiológicas, se utiliza el método sugerido por el departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en ingles) de precipitación efectiva el cual se calcula de la forma siguiente

Valores mensuales de precipitación:

$$P_{ef} = P_{mensual} * (125 - 0.2 * P_{mensual}) / 125 \quad \text{para mensual} \leq 250 \text{ mm}$$

$$P_{ef} = 125 + 0.1 * P_{mensual} \quad \text{para } P_{mensual} > 250 \text{ mm}$$

Valores decadiarios de precipitación:

$$P_{ef} (\text{dec}) = P_{dec} * (125 - 0.6 * P_{dec}) / 125 \quad \text{para } P_{dec} \leq (250 / 3) \text{ mm}$$

$$P_{ef} (\text{dec}) = (125 / 3) + 0.1 * P_{dec} \quad \text{para } P_{dec} > (250 / 3) \text{ mm}$$

Que en este caso aporta alrededor de 84mm. Con todo lo anterior es posible realizar el calendario de riego para la región de Saltillo, Coahuila mismo que es válido para la zona sureste del estado.

Cuadro 4. Calendario de riego para trigo en la región sureste de Coahuila.

Mes	Década	Etapas	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req. Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Dic	2	Inic	0.3	0.85	5.1	3.6	2.1
Dic	3	Inic	0.3	0.83	9.1	8.9	0.2
Ene	1	Inic	0.3	0.78	7.8	14.1	0
Ene	2	Des	0.38	0.96	9.6	17.8	0
Ene	3	Des	0.69	1.9	20.9	12.5	8.4
Feb	1	Des	1	3.08	30.8	5	25.8
Feb	2	Med	1.19	3.96	39.6	0.1	39.5
Feb	3	Med	1.19	4.45	35.6	1.1	34.5
Mar	1	Med	1.19	4.94	49.4	2.7	46.7
Mar	2	Med	1.19	5.42	54.2	3	51.2
Mar	3	Fin	1.12	5.3	58.3	3.8	54.5
Abr	1	Fin	0.82	4.06	40.6	4.3	36.2
Abr	2	Fin	0.52	2.69	26.9	4.9	22
Abr	3	Fin	0.33	1.77	5.3	2.1	1.8
					393.2	84	322.9



Figura 6. Abatimiento de la humedad fácilmente aprovechable para un cultivo de trigo en la región sureste de Coahuila.

## CONCLUSIONES

Es necesario validar estos resultados para llegar a una mayor aproximación

De ser posible hay que contrastar los datos de la humedad del suelo con datos tomados in situ y verificar el nivel de incertidumbre (inverso de la confianza estadística).

Se sugiere ampliar la escala de tiempo de la serie de datos meteorológicos para reducir el margen de error.

Un factor que ayuda bastante a comprender los fenómenos, es el uso de estos modelos, mismos que permiten llegar a nivel de detalle tan discreto como nos sea posible y en base a ello concluir con las respuestas adecuadas.

## RESUMEN

El riego oportuno en cualesquier cultivo pasa por la determinación de los requerimientos hídricos de los mismos, sobre esta base, independientemente del método de riego, baja presión o presurizado, es posible planificar y calendarizar el riego con un nivel de precisión bastante alto. Se ha demostrado que el riego oportuno repercute no solo en el ahorro de volúmenes importantes de agua, sino que adicionalmente, muestra ligeros incrementos en los rendimientos de los mismos.

Aún y cuando existen diversas clases texturales, de acuerdo al sistema de clasificación de suelos de la FAO, es posible dividir, para fines prácticos, en tres grandes grupos: pesados, medios y ligeros de acuerdo al tamaño y proporción del contenido de partículas minerales, con lo que se cubre el universo de suelos posibles. La información climatológica tiene validez para superficies extensas, con lo que se tienen elementos para estimar la evapotranspiración potencial (ETp) del trigo en la región. Iniciando con un modelo de simulación de potencial hídrico del suelo. Mediante un sistema de simulación biofísica, se puede establecer la acumulación de biomasa, del cual se desprende el comportamiento del factor cultural (Kc) y mediante simples operaciones aritméticas encontrar los valores de ETp diarios. Finalmente realizar el calendario de riego, considerando que en el caso de riego rodado, aforar láminas de riego por debajo de 14 cm es sumamente difícil.

## **PALABRAS CLAVE.-**

Modelos de simulación Biofísica.

Evapotranspiración Potencial.

Factor cultural.

Balance hídrico.

Isolíneas de ETo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Baker, R. J. 1990. Crossover genotype-environmental interaction in spring wheat. In: Kang, M.S. (ed). Genotype-by Environment Interaction. Louisiana State University Agricultural Center, Baton Rouge, LA. pp: 42-51

Infoagro pagina web 2013

<http://www.infoagro.com/herbaceos/cereales/trigo.htm>

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Evapotranspiración del cultivo, FAO Riego y Drenaje. Manual No 56, Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura.

U.S. Department of Agriculture, Cooperative Extension Service, University of Florida, IFAS, Florida A. & M. University Cooperative Extension Program, and Boards of County Commissioners Cooperating. Nick T. Place, Dean. Lincoln Zotarelli, Michael D. Dukes, y Kelly T. Morgan  
<http://edis.ifas.ufl.edu/ae496>

Saxton K. E. and Rawls W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. SOIL SCI. SOC. AM J., VOL. 70, SEPTEMBER–OCTOBER 2006

Solís M. E., y A. Ramirez R. 2010. Variedades de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) para el Bajío. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío. Celaya, Gto., México. Folleto Técnico Núm. 7. 40 p.

Albrecht Jochen. Semantic net of universal elementary gis functions. In. Proceedings of the International Symposium on Computer-Assisted

Cartography February 27-29, 1995. Charlotte, North Carolina.  
Disponibile en: <http://mapcontext.com/autocarto/proceedings/autocarto-12/pdf/pages245-254.pdf>

Aparicio Mijares, Francisco J, 2001, Fundamentos de Hidrología Superficial, Limusa ,. México, DF,

Aspinall R. and Pearson D. 2000. Integrated geographical assessment of environmental condition in water catchments: Linking landscape ecology, environmental modelling and GIS. *Journal of Environmental Management*, Volume 59, Issue 4, August 2000, Pages 299-319.

Aranoff, S. 1989. *Geographic information systems: a management perspective*. WDL Publications, Ottawa, Canada.

Ball Jonathan. 2002. Towards a methodology for mapping 'regions for sustainability' using PPGIS, *Progress in Planning*, Volume 58, Issue 2, Pages 81-140.

Burrough Peter A. and McDonnell Rachael A. *Principles of Geographical Information Systems (Spatial Information Systems)*. 1998. Oxford University Press. 327p.

Coppock, J.T. and Rhind, D.W. 1991. The history of GIS. En. Maguire D.J. ; Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (eds). *Geographical Information Systems: principles and applications*. Longman, London, pp.21-43.

Davis F, Quattrochi D, Ridd M, Lam N, Walsh S, Michaelsen J, Franklin J, Stow D, Johannsen C, and Johnston C. 1991. Environmental Analysis Using Integrated GIS and Remotely Sensed Data: Some Research Needs and Priorities. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57: 689-697.

Ehlers M, Greenlee D, Smith T, and Star J. 1991. Integration of Remote Sensing and GIS: Data and Data Access. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57: 669-675.

Espíldora B., Brown E., Cabrera G. Y P. Isensee, 1975 "Elementos de Hidrología" Centro de Recursos Hidráulicos. Depto de Obras Civiles. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile

Fallas, Jorge 2011 *Geoambiente* Universidad Nacional Escuela de Ciencias Ambientales. *Sistemas de Información Geográfica*, Heredia, Costa Rica.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). *Hidrometría y Sedimentos hasta 2006*. 8 CD's. CNA—SEMARNAT. IMTA. Jiutepec, Morelos. 2008

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2006, Extractor rápido de información climatológica ERIC III. Información en formato digital. CNA-IMTA. Jiutepec, Morelos.
- Posicionamiento Global en Costa Rica. Memoria. Laboratorio de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica. Programa Regional en Manejo de Vida Silvestre para Mesoamérica y el Caribe. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 75p.
- Fonseca F., Egenhofer M., Agouris P. and Câmara G. 2002. Using Ontologies for Integrated Geographic Information Systems. Transactions in GIS, vol. 6, no. 3, pp. 231-257.
- Gomes J. and Velho L. 1995. Abstraction Paradigms for Computer Graphics. The Visual Computer 11: 227-239.
- Goodchild M, Egenhofer M, Kemp K, Mark D, and Sheppard E. 1999 Introduction to the Varenus Project. International Journal of Geographical Information Science 13: 731-745.
- Goodchild Michael F., Parks Bradley O. and Steyaert Louis T. (editors). Environmental modeling with GIS, Oxford University Press, New York, 1993, 488 pp.
- Krummel, J., R. Gardner, G. Sugihara, R. O'Neill y P. Coleman. 1987. Landscape patterns in a disturbed environment. Oikos 48:321-324.
- Guillén Morales, Rafael. 1996. Diagnóstico Sistemas de Información Geográfica en el Salvador.
- Unidad Sistemas de Información Ambiental. San Salvador, El Salvador. 43p. +1 anexo.
- Lafragua J., Gutierrez A., Aguilar E., Aparicio J., Mejía R., Santillán O., Suarez M.A., Preciado M., 2003, Balance Hídrico del Valle de México. Anuario IMTA 2003 pp 40-46.
- Lillesand Thomas, Kiefer Ralph W. and Chipman Jonathan. Remote Sensing and Image Interpretation. 6th ed. Wiley. 2008. 746p.
- Marr, D. 1982. Vision. W. H. Freeman, New York.
- Maderey Rascón Laura Elena. Jiménez R., A. Principios de Hidrogeografía UNAM (2005).
- Martin M., 2003, Aspectos Básicos de la Gestión Integral del Agua., Una aplicación a la Subcuenca del Tramo Inferior del Río Ebro, II Jornadas de Ciencias Ambientales; Madrid.

- Mejía, Sandra. 1996. Diagnóstico del estado actual de los sistema de información geográfica (SIG) en Nicaragua. Proyecto NIC/94/P50. Managua, Nicaragua. 16p.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., 2011 , Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Versión 2009, Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service Blackland Research Center - Texas AgriLife Research
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CNA-2000, "CONSERVACIÓN DEL RECURSO AGUA – QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES Y EL MÉTODO PARA DETERMINAR LA DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE LAS AGUAS NACIONALES". <http://www.cna.gob.mx> (normatividad)
- Pastor, J. and Broschart, M. 1990. The spatial pattern of a northern hardwood-conifer landscape. *Landscape Ecology*, 4:55-68.
- Stöckle C. and Nelson R., 2003. Cropping Systems Simulation Model User's Manual, Biological Systems Engineering Department. Washington State University.
- Secretaría del Convenio sobre la Biodiversidad. 2004. Enfoque por ecosistemas. Programas de Trabajo del CDB. 45p.
- Steiniger Stefan and Weibel Robert. 2009. GIS Software - A description in 1000 words. University of Calgary (CA), University of Zurich (CH). Version-1.2-08.May.2009. Disponible en: [http://www.geo.unizh.ch/publications/sstein/gissoftware\\_steiniger2008.pdf](http://www.geo.unizh.ch/publications/sstein/gissoftware_steiniger2008.pdf).
- The World Conservation Union/ORMA. 1993. Management of Environmental Information in Central América. Report on Regional Institutions. San José, Costa Rica. 11p. +Anexos.
- Tortajada C, Guerrero V. Sandoval R., 2004. Hacia una gestión integral del agua en México: retos y alternativas México, Miguel Ángel Porrúa, 2004, 461 pp.