



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

## **SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA PARA EVALUAR EL DESARROLLO DE ACCESIONES DE MAIZ**

JUAN ARISTA CORTES

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

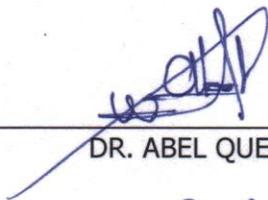
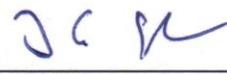
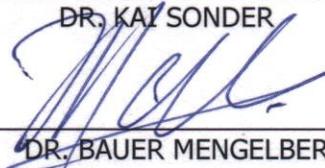
**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

2016

La presente tesis titulada: **Sistema de información geográfica para evaluar el desarrollo de accesiones de maíz**, realizada por el alumno: Juan Arista Cortes, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS  
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	 _____
	DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO
ASESOR	 _____
	DR. KAI SONDER
ASESOR	 _____
	DR. BAUER MENGELBERG JUAN RICARDO
ASESOR	 _____
	DR. LUGO ESPINOSA OZIEL
ASESOR	 _____
	DRA. BERTHA PATRICIA ZAMORA MORALES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2016

# **SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA PARA EVALUAR EL DESARROLLO DE ACCESIONES DE MAIZ**

Juan Arista Cortes  
Colegio de Postgraduados 2016

## **RESUMEN**

Se diseñó y desarrolló un Sistema de Información Geográfica (SIG) en línea para calcular los requerimientos térmicos (Grados Días de Desarrollo (GDD) y temperatura base (Tb)) de accesiones de maíz del banco de germoplasma de CIMMYT. El SIG cuenta con una base de datos con información meteorológica y un algoritmo que calcula distancias para superficies esféricas, utiliza el método inverso de la distancia al cuadrado para interpolar y el gradiente térmico altitudinal. La plataforma del sistema se constituye por: Apache como Servidor Web, PHP para interpretar lenguaje de programación en el servidor y MySQL como gestor de base de datos; para el desarrollo de mapas en línea, además, se utilizó la API V3 de Google Maps en JavaScript. El sistema considera en su diseño 14 modelos fenológicos de las accesiones donde la Tb osciló entre -2.3 y 12.1 °C, con requerimientos que varían entre 800 y 2041 GDD. El SIG se diseñó para apoyar los procesos del fitomejoramiento del cultivo de maíz, mediante la sincronización de fechas de floración y el establecimiento del periodo óptimo de la fecha de siembra.

**Palabras clave:** modelos fenológicos, accesiones de maíz, temperatura base.

# **GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM TO EVALUATE MAIZ ACCESSIONS DEVELOPMENT**

Juan Arista Cortes  
Colegio de Postgraduados 2016

## **ABSTRACT**

An on line Geographic Information System (GIS) was developed in order to calculate thermal energy requirements known as growing degree days (GDD) and base temperature for maize accessions from CIMMYT's gene bank. The system incorporates a meteorological database, an algorithm to calculate spherical distances and a square distance inverse interpolation method weighted by an altitudinal thermal gradient. The system platform consists of an Apache web server, PHP interpreter and MySQL database manager. Google Maps API V3 was used for web mapping on Javascript. Phenological models were included for 14 accessions, which base temperature fluctuate within -2.3 and 12.1 °C and GDD within 800 and 2041. The SIG developed is useful to synchronize flowering dates for plant breeding and optimum sowing dates selection.

**Key words:** phenological models, maize accessions, base temperature.

## DEDICATORIA

A mi hijo Isaac, por ser la razón de mi felicidad, además de impulsarme a seguir adelante.

A Verónica, por darme un hijo tan maravilloso.

A mi madre Lazara, que me exhorta a seguir avanzando y mi padre Juan, que lamentablemente ya no está para compartir mis logros, que en paz descanse.

A mis hermanas y sobrinos, por el apoyo moral que me brindaron.

## **AGRADECIMIENTOS**

A CONACYT por la beca que me proporciono para realizar mi doctorado con número de registro 168562.

A mi consejero, el Dr. Abel Quevedo Nolasco por la asesoría académica y de investigación así como por el apoyo brindado como amigo.

A mi consejo integrado por: el Dr. Abel Quevedo Nolasco, Dr. Kai Sonder, Dr. Juan R. Bauer Mengelberg, Dr. Oziel Lugo Espinosa y la Dra. Bertha Patricia Zamora Morales, por su asesoría durante el desarrollo de la tesis.

Al Dr. David del Valle Paniagua por los consejos y puntos de vista proporcionados en mi investigación.

La banco de germoplasma de CIMMYT por compartirme la información de las accesiones de maíz, requeridas en mi trabajo de tesis.

# CONTENIDO

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vi
CONTENIDO.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE CUADROS .....	xii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	3
2.1 HIPÓTESIS.....	3
2.2 OBJETIVO GENERAL .....	3
2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3. JUSTIFICACIÓN .....	4
4. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
4.1. Requerimientos térmicos de los cultivos .....	5
4.2 Acciones de Maíz .....	7
4.3. Sistemas de información Geográficos (SIG) .....	7
4.3.1 Geoide .....	9
4.3.2 Elipsoide .....	10
4.3.3 Datum .....	12
4.3.4 Sistema de Coordenadas .....	13
4.3.5 Proyecciones .....	13
4.3.6 Calculo de distancias en una superficie esférica .....	15
4.3.7 Gradiente Altitudinal.....	15
4.4 Sistemas geográficos en línea.....	17
4.5 Servidores Web y gestores de bases de datos.....	21
4.5.1 Servidor Web .....	21

4.5.2 Lenguaje de programación del lado del servidor .....	24
4.5.3 Sistema Gestor de base de datos.....	26
4.5.4 Modelos de datos.....	27
4.5.5 JavaScript .....	28
4.6 Información de clima en México.....	29
5. MATERIALES y MÉTODOS.....	33
5.1 Búsqueda, depuración y análisis de información de fechas de siembra para accesiones de maíz .....	33
5.2 Recopilación, formato, procesamiento y almacenamiento en base de datos de información climatológica.....	36
5.3 Generación de modelos fenológicos para las accesiones consideradas .....	37
5.4 Desarrollo de un algoritmo de interpolación y ajustarlo al gradiente térmico altitudinal.....	38
5.5 Selección de la plataforma informática. ....	40
5.6 Diseño, programación y puesta en línea, de interfaces del Sistema de Información Geográfico (SIG). ....	41
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42
6.1 Modelos fenológicos .....	42
6.2 Desarrollo del sistema GIS .....	46
6.2.1 Modelo Entidad – Relación (E-R).....	46
6.2.2 Modelo Relacional del Sistema (MR).....	48
6.3 Gradiente térmico altitudinal .....	51
7. CONCLUSIONES.....	52
8. RECOMENDACIONES .....	53
9. LITERATURA CITADA.....	54
10. ANEXOS .....	57
A1. Descripción del sistema GIS.....	57
A1.1 Interfaz del sistema.....	57
A2. Descripción de los paquetes instaladores.....	65

A.2.1 Instalación del servidor Web Apache.....	65
A.2.2. Instalación del interprete PHP. ....	66
A.2.3. Instalación de MySQL.....	66
A.2.4. Instalación del sistema SIG .....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre la tasa de desarrollo del cultivo y la temperatura. ....	6
Figura 2. Sobre posición de capas para realizar una intersección espacial. ....	9
Figura 3. Representación del Geoide y Elipsoide.....	10
Figura 4. Representación geométrica del elipsoide.....	11
Figura 5. Representación geométrica del Datum. ....	12
Figura 6. Latitud y Longitud.....	13
Figura 7. División de la tierra en Meridianos y Paralelos.....	14
Figura 8. Proyecciones cartográficas básicas. ....	14
Figura 9. Altitud de las estaciones con respecto al sitio. ....	16
Figura 10. Estaciones en el mismo plano que el sitio de interés. ....	17
Figura 11. Navegador Violawww. ....	18
Figura 12. Navegador Mosaic NCSA. ....	18
Figura 13. Big Maps (Consultado en Julio, 2016).....	19
Figura 14. Yahoo Maps (Consultado en Julio, 2016). ....	19
Figura 15. Google Maps (Consultado en Julio, 2016). ....	19
Figura 16. Google Maps API V3 (Consultado en Julio, 2016). ....	20
Figura 17. OpenLayers (Consultado en Julio, 2016). ....	20
Figura 18. Aplicación desarrollada con el API de ESRI (Consultado en Julio, 2016).20	
Figura 19. Ejemplo básico del uso del API de ESRI.....	21
Figura 20. Configuración básica de Apache.....	23
Figura 21. Estructura básica de un documento HTML. ....	24
Figura 22. Configuración básica de PHP. ....	26
Figura 23. Ejemplo Modelo Entidad – Relación.....	27
Figura 24. Ejemplo del modelo relacional. ....	28
Figura 25. Localización de las estaciones climatológicas del SMN.....	31
Figura 26. Estaciones meteorológicas automáticas (EMA) del SMN. ....	31
Figura 27. Estaciones meteorológicas de INIFAP. ....	32
Figura 28. Localización de las estaciones de CIMMYT y sitios de colecta.....	34

Figura 29. Programa para la lectura, formato y almacenamiento en información climática .....	37
Figura 30. Modelo lineal para temperatura y altitud. ....	39
Figura 31. Modelos lineales para las accesiones Vera64, Vera616, Vera617 y Vera623, de Maíz. ....	44
Figura 32. Modelos lineales para las accesiones Yuca5, Yuca47, Yuca91, Yuca158 y Chis337, de Maíz. ....	44
Figura 33. Modelos lineales para las accesiones Hida31, Hida275, Mich172, Mich426, Snlp277, de Maíz. ....	45
Figura 34. Relación entre $T_b$ y GDD para diferentes accesiones de Maíz.....	45
Figura 35. Modelo E-R Usuarios, Parcelas y cultivos.....	47
Figura 36. Modelo E-R Datos de clima y fuentes de datos. ....	48
Figura 37. Interfaz principal del sistema. ....	57
Figura 38. Registro de nuevos usuarios y palabra captcha.....	58
Figura 39. Registro de parcela y accesión de maíz.....	59
Figura 40. Niveles de acercamiento por Estado y Municipio. ....	60
Figura 41. Coordenadas geográficas de la parcela.....	61
Figura 42. Descripción de la estación EMA.....	61
Figura 43. Datos de la accesión y descripción de las principales estaciones EMA...	62
Figura 44. Cálculo de los GDD día a día.....	63
Figura 45. Días con temperaturas mínimas letales. ....	64
Figura 46. Resumen de fechas con temperaturas mínimas letales.....	64
Figura 47. Reporte del proceso de cálculo de los GDD en formato CSV. ....	65

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Elipsoides utilizados en distintas partes del mundo.....	11
Cuadro 2. Porcentaje de uso de los Servidores Web.....	22
Cuadro 3: Lenguajes de programación del lado del servidor más utilizados.....	25
Cuadro 4. Origen de las accesiones de maíz.....	34
Cuadro 5. Fechas de siembra y temperatura media del periodo Siembra-Floración.	35
Cuadro 6. Datos de temperatura para calcular el gradiente térmico. ....	38
Cuadro 7. Valores de temperatura extrapolados a la misma altitud .....	39
Cuadro 8. Parámetros de regresión, temperaturas base y GDD, para las accesiones de Maíz. ....	43
Cuadro 9. Atributos de las entidades. ....	49
Cuadro 10. Atributos de los municipios. ....	49
Cuadro 11. Datos Clima. ....	49
Cuadro 12. Estaciones de clima.....	50
Cuadro 13. Datos de los usuarios .....	50
Cuadro 15. Variedades de las accesiones.....	51



## 1. INTRODUCCIÓN

El efecto de la temperatura en los cultivos ha sido analizado en diversos estudios y han demostrado su influencia en la germinación (Butler et al., 2014; Fowler *et al.*, 2014), la floración (Noriega-González *et al.*, 2011), la polinización (Hatfield and Prueger, 2015) la tasa de producción y extensión foliar (García-Pacheco y Cándido 2002) así como la duración de las distintas etapas fenológicas (Soto *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2013).

Dada la importancia de la temperatura, es menester conocerla para cuantificar la energía térmica requerida en el desarrollo de cultivos. La principal fuente de información de temperaturas son las estaciones meteorológicas administradas por el SMN (Servicio Meteorológico Nacional), así como de instituciones de educación o investigación, públicas o privadas que cuentan con estaciones propias y que comparten dicha información.

Por otra parte, la topografía en México es muy accidentada, presentándose en algunos municipios diferencias de altitudes de hasta más de 1000 metros (Ejemplo: Texcoco, Edo. de Mex.), lo que reduce la representatividad de las estaciones meteorológicas y a su vez, demanda mayor densidad de ellas.

Existe gran cantidad de estaciones meteorológicas y climatológicas en México cubriendo la mayor parte del país, sin embargo, proporcionan datos registrados en distintos horarios, unidades de medida y formatos, lo que dificulta su integración, consulta y utilización en la toma de decisiones.

Por otro lado, si se cuenta con suficiente densidad de estaciones, los valores de temperatura medidos, serán más representativos y por ende más confiables en el cálculo de la temperatura, así como en la estimación de los requerimientos térmicos.



Conocer dichos requerimientos permite estimar la duración del ciclo agrícola, lo que a su vez coadyuva en la selección del periodo óptimo de siembras.

El principal cultivo sembrado en México es el maíz, con una superficie sembrada de maíz grano de 7,426,412 ha y una producción de 23,273,257 ton (SIAP, 2014), las siembras se localizan en altitudes desde 5 m hasta 2900 m (Ruiz *et al.* 2009) y la duración de los ciclos de 90 a 150 días (Ruiz, 1985).

Por lo anterior, en el presente trabajo se desarrolló un Sistema de Información Geográfica (SIG) que cuenta con una base de datos de: estaciones meteorológicas con información de temperatura, tablas para el registro de usuarios, parcelas y cultivos, así como requerimientos térmicos para algunas Accesiones de maíz. Este sistema calcula la fecha de siembra a partir de modelos fenológicos para 14 Accesiones de maíz, haciendo uso de datos de temperatura de estaciones cercanas, considerando el gradiente térmico altitudinal e interpolando por el método de inverso del cuadrado de la distancia.



## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2.1 HIPÓTESIS**

Es posible generar un Sistema de Información Geográfica (SIG) en línea que integre variables meteorológicas, requerimientos térmicos del cultivo, altitud de zonas de estudio para evaluar el establecimiento en el espacio (parcela) y tiempo (de siembra a cosecha) de las Accesiones de maíz a partir de los requerimientos térmicos (GDD,  $T_b$ , y temperatura mínima).

### **2.2 OBJETIVO GENERAL**

Generar un Sistema de Información Geográfico (SIG) en línea, que apoye la toma de decisiones para evaluar el establecimiento de diferentes variedades de maíz (accesiones) a partir de los requerimientos térmicos.

### **2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desarrollar modelos fenológicos a partir de temperaturas promedio de periodos siembra a floración para variedades de maíz.
- Diseñar y generar una base de información meteorológica que facilite la generación de modelos fenológicos para variedades de maíz.
- Elaborar manual de usuario de la interfaz del Sistema de Información Geográfico (SIG) y de instalación, así como la encapsulación de los paquetes instaladores.



### 3. JUSTIFICACIÓN

Existen modelos fenológicos desarrollados por distintos autores que no son aplicados en un SIG en línea que integre información meteorológica, fenológica y geográfica. Por lo que contar con un sistema que integre todas estas variables permitirá disponer de una herramienta que apoye los procesos de fitomejoramiento del maíz, mediante la sincronización de fechas de floración y el establecimiento del periodo óptimo de la fecha de siembra, incluso planear en función de la oferta y demanda del mercado, y así definir periodos con una mayor productividad, disminuyendo los riesgos (por bajas temperaturas).



## 4. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. Requerimientos térmicos de los cultivos

Los cultivos inician su desarrollo a partir de una temperatura mínima llamada temperatura base ( $T_b$ ), donde la tasa de crecimiento es mayor al alcanzar una temperatura óptima ( $T_o$ ) y sucumben al presentarse una temperatura máxima o umbral ( $T_u$ ). Para el óptimo desarrollo de cultivos se recomiendan temperaturas en el rango  $T_b$  a  $T_o$ , conocer ese rango permite la integración diaria de la energía térmica o día grado crecimiento ( $D^\circ$ ) requerida para su completo desarrollo. La integración se realiza con la suma de los días grado crecimiento ( $D^\circ$ ) dentro de dicho rango durante todo el ciclo agrícola; la suma total se le denomina Grados Días de Desarrollo (GDD).

Los valores de temperatura base y óptima para maíz comúnmente utilizados son  $T_b = 10^\circ\text{C}$  y  $T_o = 30^\circ\text{C}$  (Gilmore and Rogers, 1958; Cross y Zuber, 1972; Hou *et al.*, 2014), sin embargo, valores distintos han sido reportados por diversos autores como Warrington y Kanemasu (1983) que reportaron  $T_b = 8.9^\circ\text{C}$  y  $T_o = 30^\circ\text{C}$  para germinación y emergencia, así como  $T_b$  entre  $7^\circ$  y  $8^\circ\text{C}$  y  $T_u = 28^\circ\text{C}$  para floración. Por otro lado, Birch *et al.* (1998) encontraron  $T_b = 8^\circ\text{C}$  y  $T_o = 34^\circ\text{C}$  para maíz en Australia. Así mismo, valores de  $T_b = 7^\circ\text{C}$  y  $T_o = 27^\circ\text{C}$  fueron estimados para Valles Altos en México por Hernández y Carballo (1984) y cuyos valores coinciden con los reportados por Narval y Malik (1986) para invierno en el Noroeste de India. Del mismo modo García-Pacheco y Cándido (2002) recomiendan  $T_b = 7.5^\circ\text{C}$  para que inicie el proceso de extensión foliar y Ruiz *et al.*, (1998) reportaron  $T_b$  entre  $2^\circ\text{C}$  y  $10^\circ\text{C}$  para 49 razas mexicanas de maíz.

Los valores de  $T_o$  y  $T_u$  son obtenidos a partir de experimentos en cultivos donde se realiza un incremento paulatino de temperatura registrando los valores donde el desarrollo del cultivo empieza a detenerse ( $T_o$ ) y cuando finalmente muere ( $T_u$ ). Por otro lado, la  $T_b$  se calcula a partir de modelos que utilizan datos de fechas de

siembra y floración, así como de temperatura, dichos modelos pueden ser lineales o no lineales, ambos se basan en la gráfica de desarrollo de cultivos con respecto a la temperatura (Figura 1), dicho desarrollo tiene un incremento lineal entre la  $T_b$  y  $T_o$  por lo que es posible modelarlo con la siguiente ecuación (Monteith, 1977):

$$1/t = \alpha T + \beta \quad \text{Ecuación 1.}$$

Dónde:

t: duración en días del periodo entre la siembra hasta la floración (S-F)

T: temperatura media del S-F en °C.

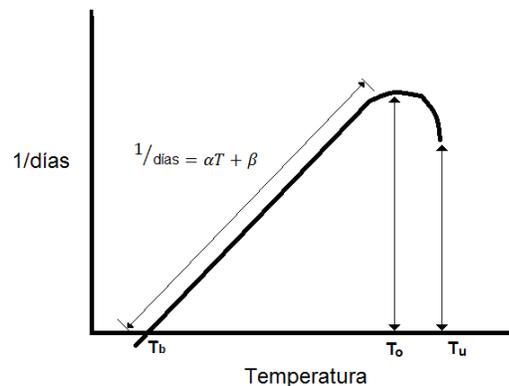
$\alpha$  y  $\beta$ : parámetros obtenidos mediante una regresión lineal simple

Igualando la ecuación 1 a cero se obtiene la temperatura base.

$$T_b = -\frac{\beta}{\alpha} \quad \text{Ecuación 2.}$$

Para el cálculo de lo GDD se utiliza el cociente:

$$1/\alpha \quad \text{Ecuación 3.}$$



**Figura 1.** Relación entre la tasa de desarrollo del cultivo y la temperatura.



Los modelos no lineales consideran el rango de temperaturas desde  $T_b$  hasta  $T_u$  (Figura 1), por lo que llegan a utilizar dos funciones, la primera para la parte de crecimiento lineal y la segunda para la del decrecimiento, como es el caso del modelo OCHU (Ontario corn heat unit) utilizado en Canadá.

## 4.2 Accesiones de Maíz

En 1940 la Fundación Rockefeller en conjunto con la secretaria de Agricultura en México y con la finalidad de preservar el germoplasma, se realizó la primera colecta de maíces nativos en México creando así el banco de germoplasma y la oficina de estudios especiales que más tarde se convertiría en CIMMYT. Cada muestra colectada se le denomina accesión de maíz y se le nombra utilizando las primeras letras del nombre de la entidad federativa donde se colecto y un número consecutivo.

Para preservarlas las semillas, el CIMMYT realiza siembras sistemáticas cada año y ciclo agrícola en sus estaciones de campo, para mantener el inventario de semilla y la viabilidad de germinación mayor a 85 %. Adicionalmente se registran las fechas de siembra, floración, senescencia y cosecha.

## 4.3. Sistemas de información Geográficos (SIG)

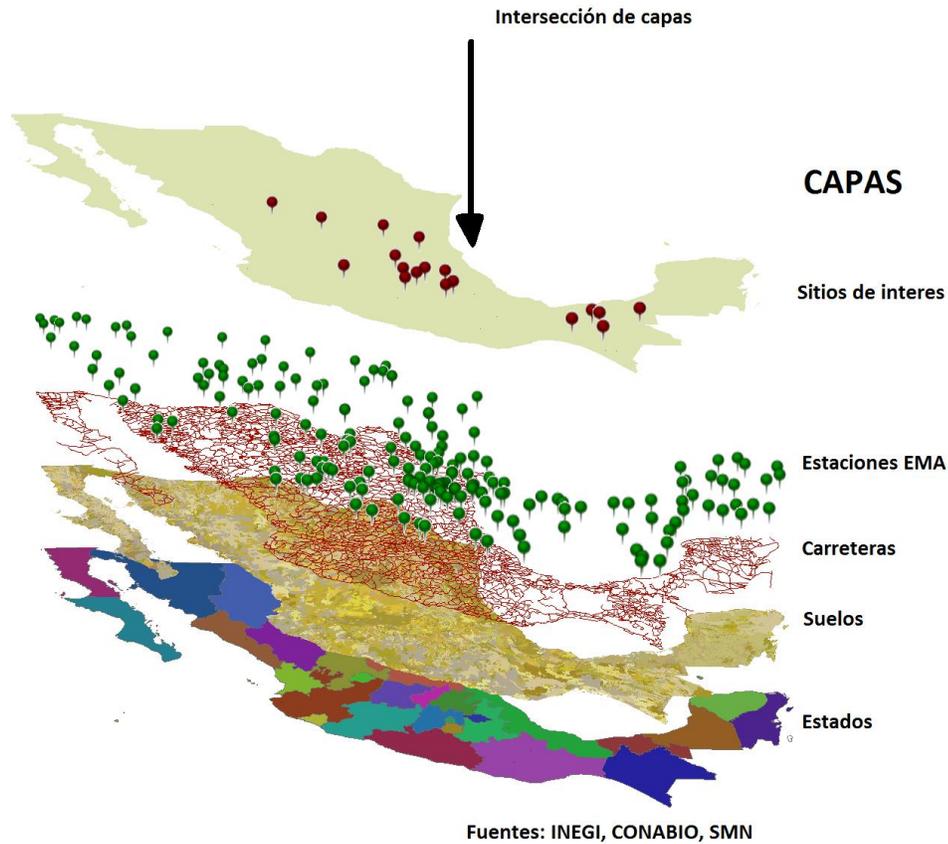
Un sistema de Información Geográfica (SIG) es un conjunto de herramientas compuesto por Software, Hardware, personal humano y datos para representar el mundo real mediante mapas, para ello se requiere que los datos tengan un componente espacial (coordenadas geográficas).



Los datos son agrupados temáticamente y se representan espacialmente por puntos, líneas, polígonos o imágenes, a cada grupo se le denomina capa espacial y los SIG permiten sobre-poner dichas capas para realizar intersecciones sobre un punto o área geográfica específica con la finalidad de obtener la información que brinda cada capa, esta acción se le llama intersección espacial.

Con los SIG es posible administrar gran cantidad de información de manera clara y fácil de comprender ya que toda esta información se plasma gráficamente sobre un mapa.

Como ejemplo de lo anterior, en la Figura 2 se pueden observar las capas de: Entidades de México, tipos de suelos, carreteras y estaciones meteorológicas EMA y la capa de sitios de interés ubicados con coordenadas geográficas, la idea es conocer cuál es la entidad y tipo de suelo, así como la estación meteorológica y carretera más cercanas a dichos sitios, para ello se realizó una intersección de capas y algunos procesos de los SIG como distancias más cercanas. El resultado sería devuelto en una tabla con los siguientes campos: número de sitio, entidad, nombre del tipo de suelo, carretera y estación EMA más cercana al sitio. Finalmente, con dicho resultado es posible tomar decisiones como: elegir un cultivo que mejor se adapte al tipo de suelo y precipitación de algún sitio en particular y seleccionar la ruta de acceso más cercana.



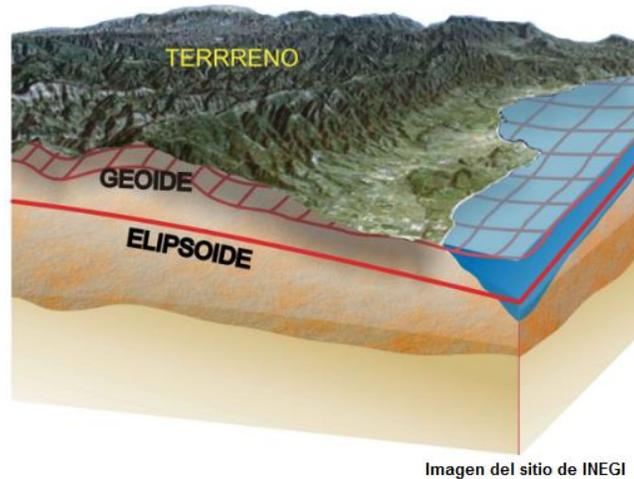
**Figura 2.** Sobre posición de capas para realizar una intersección espacial.

#### 4.3.1 Geoide

El geoide es la superficie teórica de la tierra cuya gravedad es igual en cualquier punto y continúa por debajo de los continentes y océanos suponiendo ausencia de mareas (Figura 3), dicha superficie no es uniforme por la composición mineral del interior de la tierra y sus distintas densidades.

Los SIG requieren modelos matemáticos para representar el geoide de la tierra el cual es tan complejo que no es posible modelarlo completamente, razón por la cual se hace uso de un elipsoide que se ajuste lo mejor posible al geoide de la tierra.

Una aplicación que se le da al geode es la de utilizarlo como superficie de referencia de la altura ortométrica o altitud sobre el nivel medio del mar, comúnmente utilizada en topografía, cartografía, fotografía aérea, modelos digitales de elevación entre otros.



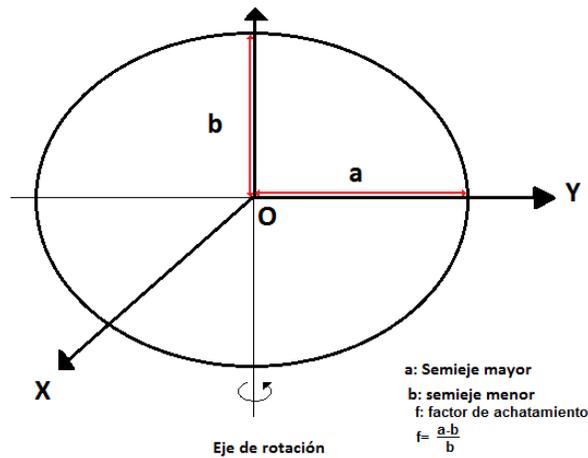
**Figura 3.** Representación del Geoide y Elipsoide.

#### 4.3.2 Elipsoide

El elipsoide es el resultado de girar una elipse sobre su eje (Figura 4) es llamado también elipsoide de revolución y permite la representación geométrica de la superficie terrestre, la cual al ser bastante irregular ha dado origen a distintos elipsoides, buscando el que mejor se ajuste al geoide. Algunos de los elipsoides utilizados son se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Elipsoides utilizados en distintas partes del mundo.

Elipsoide	Semieje mayor	Semieje menor	1/f
Australian National	6378160	6356774.719	298.25
Bessel1841	6377397.155	6356078.963	299.1528
Clarke 1866	6378206.4	6356583.8	294.9787
Clarke 1880	6378249.145	6356514.87	293.465
Everest 1956	6377301.243	6356100.228	300.8017
Fischer 1968	6378150	6356768.337	298.3
GRS 1980	6378137	6356752.314	298.2572
International 1924 (Hayford)	6378388	6356911.946	297
SGS 85	6378136	6356751.302	298.257
South American 1969	6378160	6356774.719	298.25
WGS	72 6378135.000	6356750.52	298.26
WGS	84 6378137.000	6356752.314	298.2572

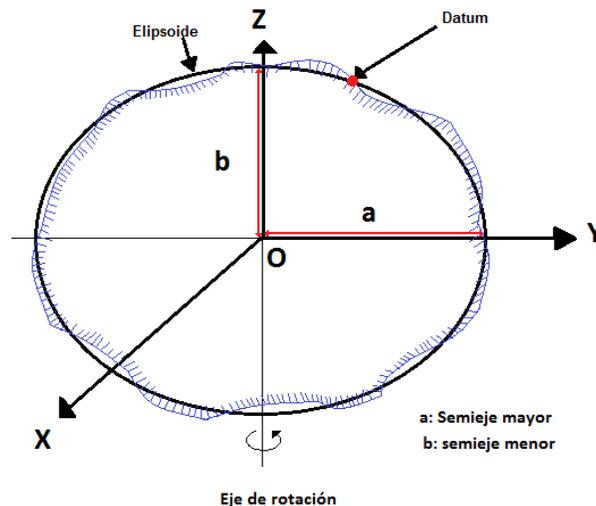


**Figura 4.** Representación geométrica del elipsoide.

### 4.3.3 Datum

Dado que el elipsoide y el geoide son geoméricamente distintos, se requiere de un punto en el espacio donde ambos coincidan para definir el punto de inicio, el cual será utilizado por los sistemas de coordenadas. Este punto llamado fundamental es el Datum, el cual se define como el punto tangente al elipsoide y geoide donde ambos son coincidentes (Figura 5).

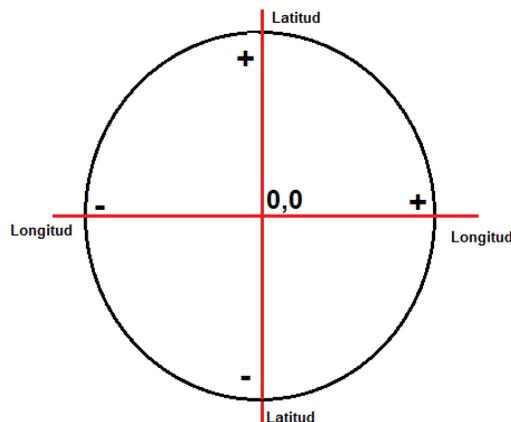
A lo largo de la historia diversos elipsoides se han desarrollado para ajustarse a cada país, algunos de los cuales son: ED50 (European Datum, 1950), ITRF (International Terrestrial Reference Frame), WGS84 (World Geodetic System), ETRS89 (European Terrestrial Reference System), entre otros



**Figura 5.** Representación geométrica del Datum.

#### 4.3.4 Sistema de Coordenadas

Dado que se utiliza un elipsoide para representar la forma de la tierra, se hace uso de elementos de la trigonometría esférica para ubicar puntos sobre la superficie terrestre, de ahí nace el concepto de latitud y longitud para establecer las coordenadas geográficas (Figura 6). El punto de origen del sistema de coordenadas es el ecuador y el meridiano de Greenwich en Inglaterra. La latitud es positiva del ecuador al polo norte y negativa del ecuador al polo sur, por su parte la longitud es negativa del meridiano de Greenwich en dirección a Asia y positiva en dirección a América.

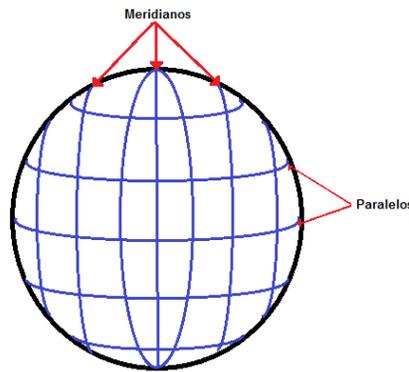


**Figura 6.** Latitud y Longitud.

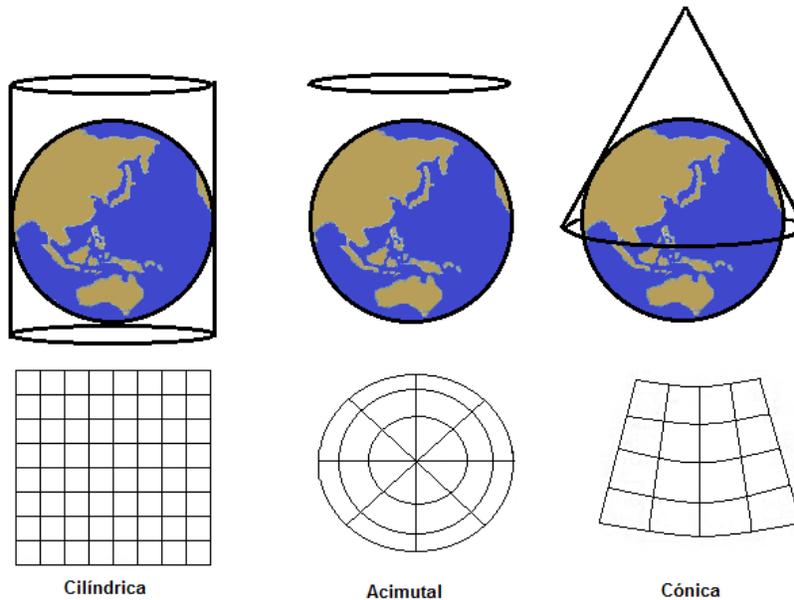
#### 4.3.5 Proyecciones

Para poder dibujar la superficie terrestre en un mapa cartográfico se divide la tierra en líneas teóricas paralelas y perpendiculares al ecuador, las primeras se denominan paralelos y las segundas meridianos (Figura 7), por último, se requiere de un sistema de proyección los cuales derivan de tres proyecciones básicas que son: cilíndrica, acimutal y cónica. Para cada proyección se presenta un área con mayor precisión a

partir de la cual se va distorsionando hasta llegar a un punto cuya deformación es tan grande que dicha proyección ya no es funcional, por lo que dependiendo de la posición en el globo terrestre se tendrá una proyección que mejor se ajuste, por ejemplo, la proyección cilíndrica se ajusta mejor en regiones cercanas al ecuador, pero no así en los polos que es donde presenta la mayor distorsión. Por otro lado, la proyección acimutal se ajusta mejor en los polos, y la cónica en latitudes entre los polos y el ecuador (Figura 8).



**Figura 7.** División de la tierra en Meridianos y Paralelos.



**Figura 8.** Proyecciones cartográficas básicas.

Con la llegada de los satélites el departamento de defensa de Estados Unidos creó el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), el cual requiere de un Datum Universal para posicionar objetos en cualquier parte del globo terrestre, para ello se creó el sistema geodésico mundial (WGS, World Geodesic System), el cual ha tenido revisiones y el más reciente es el Datum WGS84, cuyos parámetros son: Semieje mayor  $a=6378137.0$  m y semieje menor  $b=6356752.3142$  m

#### 4.3.6 Calculo de distancias en una superficie esférica

En un plano recto bidimensional el cálculo de distancias se realiza con el teorema de Pitágoras; sin embargo, para las distancias de la curvatura terrestre se puede utilizar la fórmula de Harversine, la cual es una adaptación de la de Pitágoras en un plano esférico por lo que, las coordenadas estarán en radianes y la longitud del radio terrestre es requerido, el cual difiere con la latitud (ecuación 4).

$$d = 2r * \arcsen \left( \sqrt{\text{sen}^2 \left( \frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \text{sen}^2 \left( \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

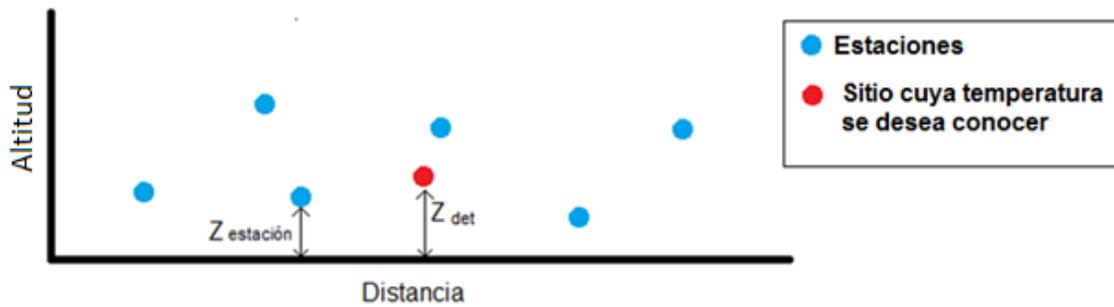
$\phi_1, \phi_2$  = Latitud (radianes)

$\lambda_1, \lambda_2$  = Longitud (radianes)

$r$  = radio terrestre (ecuatorial: 6378.1 km, polar: 6356.8 km, medio: 6371.0 km)

#### 4.3.7 Gradiente Altitudinal

Diversos estudios han demostrado la correlación que existe entre la altitud y la temperatura, siendo con un modelo lineal la mejor forma de representar dicha correlación. Lo anterior es necesario considerar al realizar interpolaciones donde la fuente de información son estaciones meteorológicas ubicadas a distinta altitud (Figura 9).



**Figura 9.** Altitud de las estaciones con respecto al sitio.

Por lo anterior, si se conoce la altitud  $Z$  y su temperatura  $T$  de las estaciones meteorológicas, es posible expresar la temperatura en función de la altitud con el modelo lineal de la Ecuación 5.

$$T = \alpha Z + \beta \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$T$ : temperatura de la estación ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$Z$ : altitud de la estación (m).

A la pendiente de la recta de la Ecuación 5 se le denomina gradiente térmico y se utiliza para estimar el valor de la temperatura por estación en el mismo plano del sitio de interés (Figura 10), para ello se le adiciona el producto del gradiente térmico por la diferencia de cotas entre la estación meteorológica y el sitio de interés (Ecuación 6)

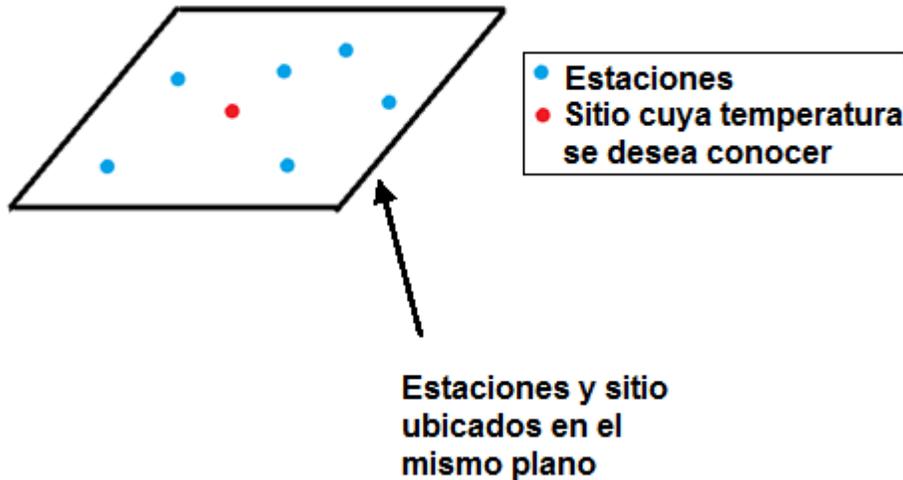
$$T_{det} = T_{estación} + m(Z_{estación} - Z_{det}) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$T_{det}$  = temperatura de la estación al mismo plano que el sitio de interés.

$T_{estación}$  = temperatura que reporta la estación

$m$  = gradiente térmico (parámetro  $\alpha$  de la Ecuación 5)



**Figura 10.** Estaciones en el mismo plano que el sitio de interés.

#### 4.4 Sistemas geográficos en línea.

La comunicación en red entre ordenadores inicio desde la década de los 50 cuando se crearon módems para transmitir datos de forma binaria mediante líneas telefónicas formando pequeñas redes de trabajo privadas o de institutos de investigación, esto trajo consigo diversidad de protocolos de comunicación propios de cada red, lo que dificulto la comunicación entre redes por falta de un estándar. Para 1970 el departamento de defensa de Estados Unidos creo la red ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) cuya finalidad fue la de comunicar instituciones académicas y estatales, esta red tuvo vigencia hasta 1983 cuando se transfirió la comunicación al protocolo TCP/IP (Transmission Control Protocol, Internet Program) cuyo desarrollo inicio en 1974 (Cerf *et al.* 1974). Posteriormente en los años noventa con el estándar TCP/IP fue posible el desarrollo de la red mundial de Internet o WWW (World Wide Web). Con la expansión de la WWW se crearon millones de sitios Web, lo que propicio el desarrollo de programas navegadores, siendo el programa ViolaWWW (Figura 11) el primer navegador web gráfico (Wei, 1993) que más tarde fue desplazado por Mosaic NCSA (Figura 12).

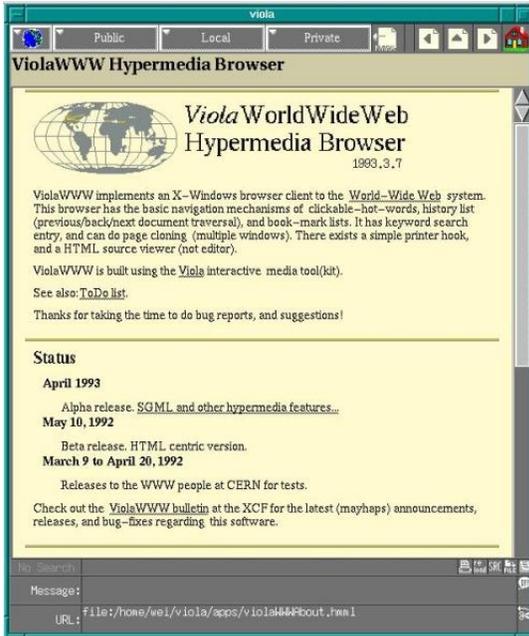


Figura 11. Navegador Violawww.

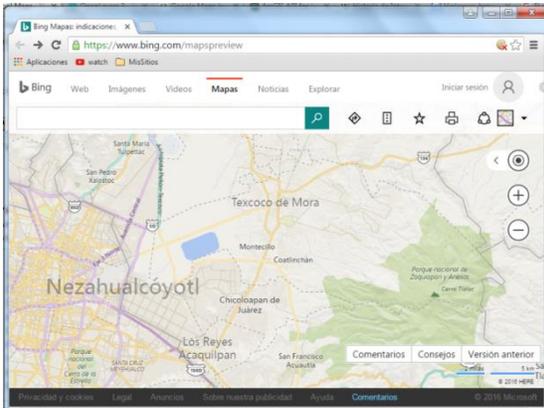


Figura 12. Navegador Mosaic NCSA.

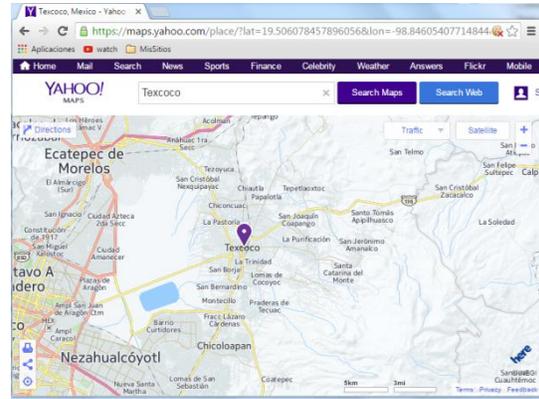
Actualmente los navegadores permiten el envío de texto, gráficos y multimedia de gran resolución, lo que ha permitido el uso de los SIG en Internet. Para que un SIG pueda ser utilizado en un navegador Web se requiere realizar el geo-procesamiento en un servidor que cuente con Software de SIG y enviar los mapas resultantes en mosaicos de imágenes a los usuarios vía Internet; por otro lado, se requiere de un medio de comunicación entre el usuario y el servidor SIG para envío de peticiones, para ello utilizan los objetos del DOM (Document Object Model) del lenguaje HTML (HyperText Markup Language) reconocido por los navegadores. Con el DOM es posible agregar imágenes, etiquetas, iconos, colores y dar efectos para mostrar mapas.

Hoy en día existen proveedores SIG en línea que proporcionan algunos servicios como: mapas topográficos, imágenes satelitales, cálculo de rutas, fotografías, recorridos en 3D, tránsito, obstrucciones y accidentes en vialidades, información de clima, altitud y rutas de transporte público, entre otros. Para la simulación del acercamiento y alejamiento el servidor SIG envía un mosaico de imágenes por cada nivel de acercamiento lo que limita dichos niveles a menos de veinte. Algunos de los

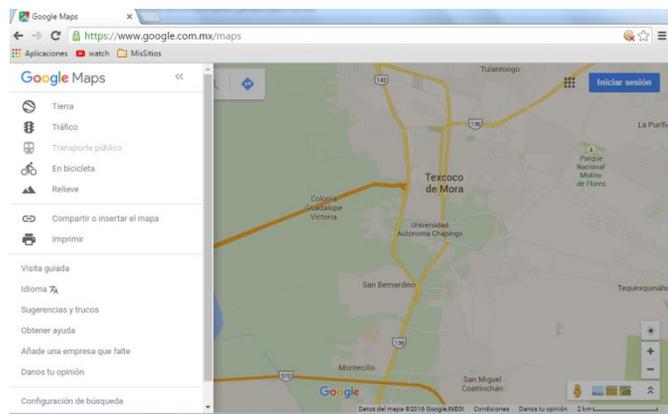
servidores SIG con las características mencionadas anteriormente son: Big Maps, Yahoo Maps y Google Maps (Figuras 13, 14 y 15).



**Figura 13.** Big Maps (Consultado en Julio, 2016).



**Figura 14.** Yahoo Maps (Consultado en Julio, 2016).



**Figura 15.** Google Maps (Consultado en Julio, 2016).

Existen otros servicios SIG que proporcionan un API (Application Programming Interface) con el cual mediante un lenguaje de programación permite embeber los servicios SIG en sitios Web de los usuarios, del mismo modo permite agregar, polígonos, líneas, puntos, imágenes sobre los mapas así como modificar colores de coberturas e iconos. Algunos de los API en esta categoría son Google Maps API V3 y Open Layers (Figuras 16 y 17).

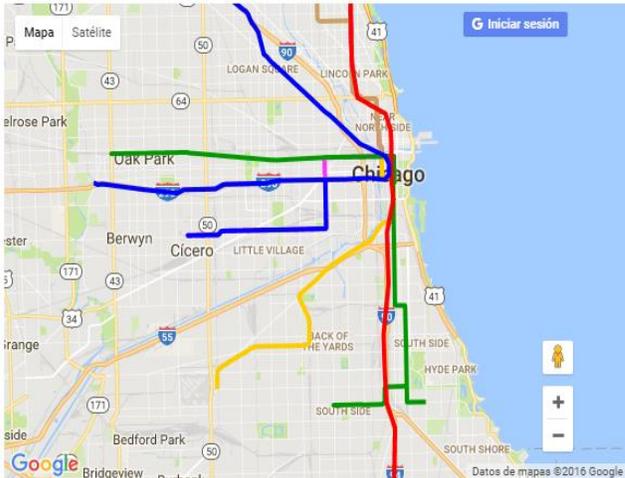


Figura 16. Google Maps API V3 (Consultado en Julio, 2016).



Figura 17. OpenLayers (Consultado en Julio, 2016).

Por otra parte, la empresa ESRI desarrolladora de Software GIS proporciona una API en JavaScript, para personalizar mapas y enviar peticiones de geo-procesamiento, así como de agregar capas espaciales en su nube y compartirlas con distintos niveles de usuarios, del mismo modo cuenta con fracciones de código que facilitan la creación de componentes como menús, listas, leyendas, entre otros (Figura 18).

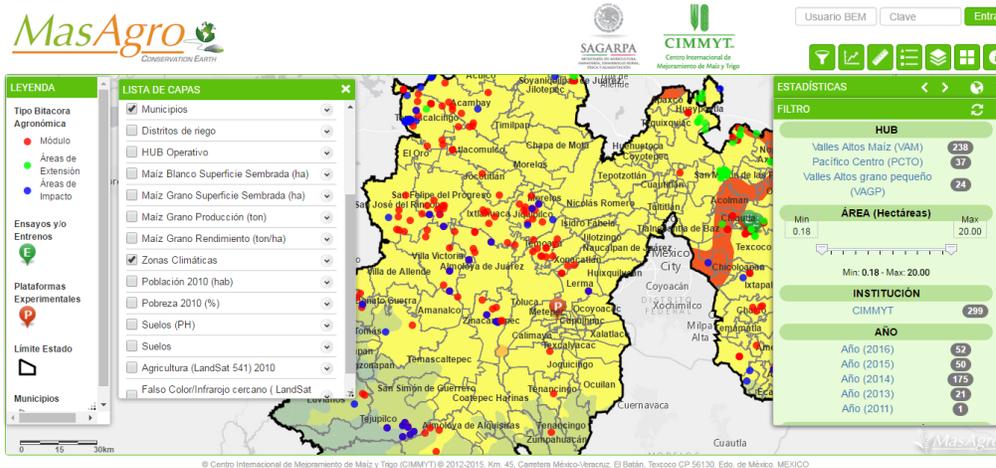


Figura 18. Aplicación desarrollada con el API de ESRI (Consultado en Julio, 2016).

Para desarrollar un sitio Web utilizando el API de ESRI se requiere crear la estructura básica de la página HTML y dentro de las etiquetas <script> referir los

estilos y la versión del API de ESRI, así como las distintas librerías del API requeridas para manejo de coberturas, estilos, colores, leyendas, etc. Por último, se crea el objeto DIV de HTML donde el API de ESRI mostrara el mapa (Figura 19).

```
<html>
<head>
<script>
  <link rel="stylesheet" href="https://js.arcgis.com/3.17/dijit/themes/tundra/tundra.css">
  <link rel="stylesheet" href="https://js.arcgis.com/3.17/esri/css/esri.css">
  <script src="https://js.arcgis.com/3.17/"></script>
  require(["esri/map", "esri/layers/FeatureLayer",
    "esri/Color", ....., "esri/InfoTemplate",
    "dojo/domReady!"]
  ),
  function(
    Map, FeatureLayer,
    Color, ..., InfoTemplate)
  ) {
    map = new Map("map", {
      basemap: "streets",
      center: [-101.363627, 21.602322],
      zoom: 5,
      slider: false
    });
    -----
    -----
    -----
  }
</script>
</head>
<body>
  <div id="map">
  | </div>
</body>
</html>
```

Estilos para Web proporcionados por ESRI

Llamada al API de ESRI

Librerías del API que se desean utilizar

Renombre de las librerías para su uso en el código

Creación del objeto Map y listado de parámetros como mapa base, coordenadas del centro del mapa, nivel de acercamiento, etc.

Funciones del usuario para el manejo de los objetos API de ESRI

Objeto DIV en HTML que funge como contenedor del mapa

Figura 19. Ejemplo básico del uso del API de ESRI.

## 4.5 Servidores Web y gestores de bases de datos

### 4.5.1 Servidor Web

Un servidor Web(SW) es un programa desarrollado para comunicar ordenadores en Internet, con la ayuda de protocolos como el HTTP (HiperText Transfer Protocol) o el HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure). Con estos protocolos pueden esperar, recibir y contestar peticiones, para ello el SW consulta bases de datos, procesa información y envía los resultados en archivos de imagen, multimedia, binarios o de texto, todos referidos y ordenados dentro de los lenguajes HTML (HyperText Markup

Language) y JavaScript interpretados por los navegadores del lado del cliente. Adicionalmente el SW puede enlazar con protocolos como FTP (File Transfer Protocol) o SMTP (Simple Mail Transfer Protocol).

Existen diversos SW para distintos sistemas operativos (SO), el más popular es el Apache utilizado por el 52% de los sitios Web, seguido por Nginx con el 30.6% y Microsoft-IIS con el 12%( Cuadro 2)

**Cuadro 2.** Porcentaje de uso de los Servidores Web

<b>Servidor Web</b>	<b>Uso</b>
Apache	52%
Nginx	30.6 %
Microsoft-IIS	12%
LiteSpeed	2.3%
Google Servers	1.3%
Tomcat	0.6%
IdeaWebServer	0.3%
Apache Traffic Server	0.2%
Node.js	0.2%
Tengine	0.1%
Cowboy	0.1%
Lighttpd	0.1%
Oracle Servers	0.1%
IBM Servers	0.1%

Fuente: <http://w3techs.com>. Consultado en junio 2016.

El servidor Apache es un SW que utiliza el protocolo HTTP, es de código abierto y se utiliza para la creación de sitios web, es relativamente fácil de configurar y se encuentra vasta documentación en línea, así mismo puede ser instalado en distintos Sistemas Operativos como Windows, Linux o MacOS (es multiplataforma), por otra parte es robusto y muy seguro ante los ataques cibernéticos, además existen

distintos intérpretes de código de lenguajes de programación del lado del servidor(LPLS) que son compatibles con Apache, como PHP, Perl, JavaServer Page, entre otros.

Para la configuración básica del servidor Apache es necesario definir el puerto de internet donde se visualizaran las páginas Web usualmente es el puerto 80, sin embargo si este ya está ocupado por algún otro SW, se puede utilizar el 8080, por otro lado se define la ruta donde se alojan dichas páginas en el servidor, así mismo el nombre y extensión de las páginas Web principales y por último los programas o “dll” que enlazan Apache con los interpretes LPLS y archivos adicionales de configuración( Figura 20).

```
Listen 8080 ← Puerto de Internet

<Directory "c:/Apache24/htdocs"> ← Páginas Web con código HTML, PHP, etc.

<IfModule dir_module>
  DirectoryIndex index.html index.php ← Páginas reconocidas como
</IfModule>                                     principales del sitio Web

LoadModule php5_module "C:/php5_4_19_vc9_x86/php5apache2_4.dll" ← Referencia a programas que enlazan
AddHandler application/x-httpd-php .php                                Apache con los interpretes de
                                                                    lenguajes de programación del lado
                                                                    del servidor, en este caso a PHP

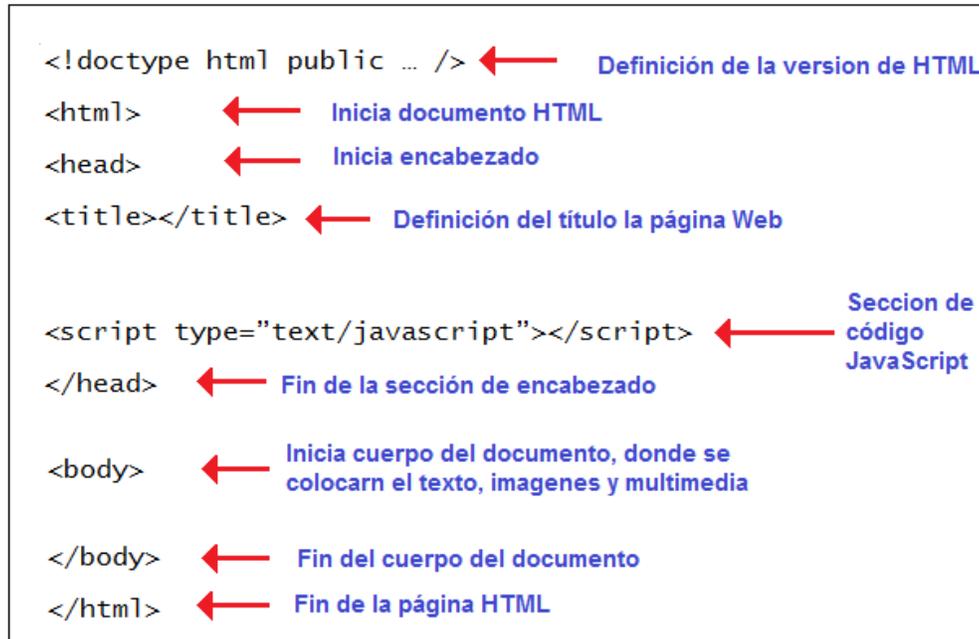
# configure the path to php.ini
PHPIniDir "C:/php5_4_19_vc9_x86" ← Referencia al archivo de configuración de los
                                                                    interpretes, en este caso a php.ini
```

**Figura 20.** Configuración básica de Apache.

El HTML es un lenguaje estandarizado y reconocido por los navegadores Web, permite ordenar, dar formato y posicionar en la pantalla del cliente la distinta información proveniente del servidor como texto, imágenes o multimedia. Un documento con código HTML tiene una estructura definida cuyas secciones son: Definición de la versión HML, títulos, encabezados y cuerpo del documento (Figura 21).

Para delimitar cada sección se utilizan etiquetas las cuales se definen de la siguiente forma: <etiqueta></etiqueta> así mismo se tienen etiquetas para embeber imágenes

(<image></image>), textos (<p></p>, <table></table>, etc.) y multimedia (<video><source src="..." type="..."></video>).



**Figura 21.** Estructura básica de un documento HTML.

#### 4.5.2 Lenguaje de programación del lado del servidor

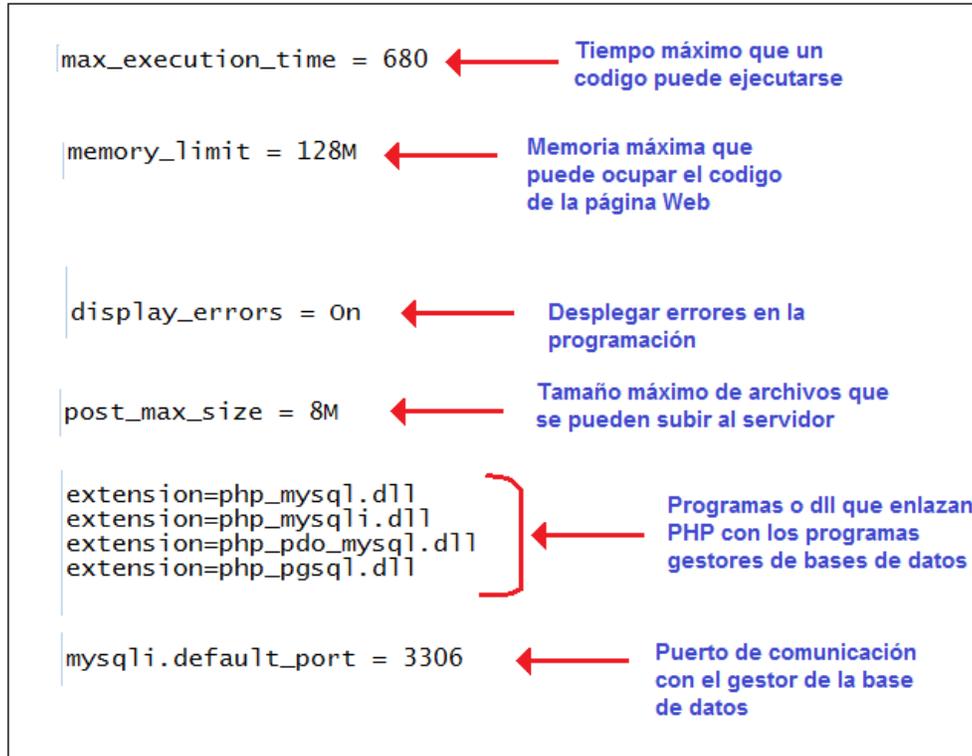
Un Lenguaje de Programación del Lado del Servidor (LPLS) es interpretado en el servidor web para realizar tareas como accesos a bases de datos, conexiones de red, preparación de documentos y generación de páginas con contenidos en HTML y JavaScript que serán enviadas al cliente. Una característica de los LPLS es que sus procesos no son visibles del lado del cliente, lo que brinda seguridad informática. El LPLS más comúnmente utilizado en los sitios Web es PHP con el 82.1 % seguido por Asp.Net con el 15.8% (Cuadro 3).

**Cuadro 3:** Lenguajes de programación del lado del servidor más utilizados

Lenguaje	Uso
PHP	82.1%
Asp.Net	15.8%
Java	2.7%
Static files	1.5%
ColdFusion	0.7%
Rubi	0.6%
Perl	0.4%
JavaScript	0.3%
Python	0.2%
Erlang	0.1%

Fuente: <http://w3techs.com>. Consultado en junio 2016.

Para la configuración básica de PHP se requiere establecer el tiempo máximo que el código de la página Web puede utilizar, así como la memoria del servidor, desplegar errores del código y el tamaño máximo de los archivos que se pueden subir al servidor, por otra parte, se definen los programas o dll que enlazan PHP con los gestores de bases de datos y el puerto que utilizara (Figura 22).



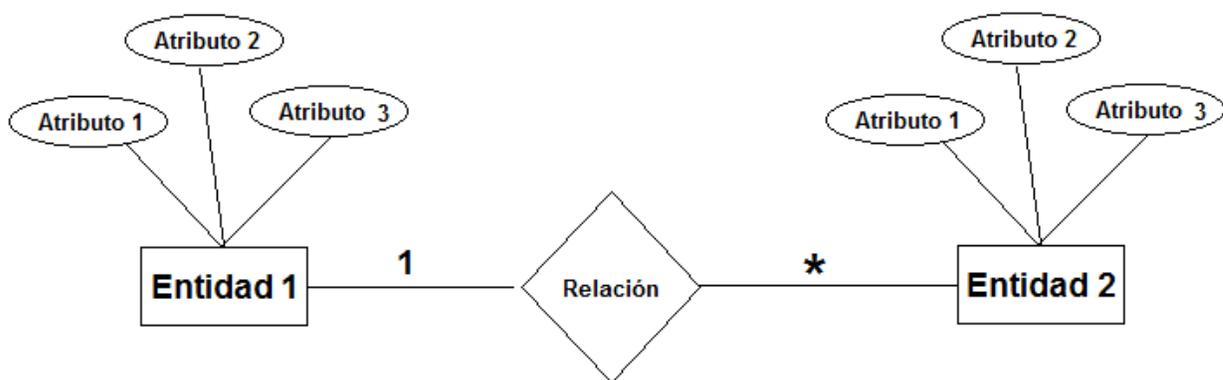
**Figura 22.** Configuración básica de PHP.

#### 4.5.3 Sistema Gestor de base de datos

Un Sistema Gestor de Bases de Datos (SGBD) es un programa utilizado para almacenar, editar, consultar y analizar información de bases de datos, así mismo contiene herramientas para automatizar procesos, generar informes, mantener la integridad de la información y recuperar información de bases de datos dañadas. Los SGBD utilizan el lenguaje SQL (Structured Query Language) para realizar las distintas operaciones de lectura y escritura a la base de datos. Entre los principales SGBD están: MySQL, Oracle, SQL Server, Microsoft Access, Visual FoxPro, PostgreSQL, Apache Derby, DB2, DB2Express-C y SQLite.

#### 4.5.4 Modelos de datos

La estructura de datos se encuentra definida por el modelo de datos, el cual es un conjunto de herramientas conceptuales para describirlos, así como para la implementación de relaciones, semántica y restricciones de consistencia. Los modelos más utilizados son el Entidad-Relación (E-R) y el relacional (MR). El modelo E-R percibe el mundo real mediante objetos básicos llamados entidades, así como la relación que existe entre dichos objetos, cada entidad posee un conjunto de valores agrupados en columnas llamadas atributos y para cada entidad existe uno o más atributos cuyos valores son únicos y sirven como identificador inequívoco de las entidades. Las relaciones son asociaciones entre varias entidades, cuyos valores posibles son uno a uno, uno a muchos o muchos a muchos. El modelo E-R se expresa gráficamente mediante diagramas con rectángulos que representan las entidades, elipses que representan a tributos, rombos para indicar relaciones entre conjuntos de entidades y líneas para unir atributos entre entidades. En la Figura 23 se muestra un ejemplo del modelo E-R donde la primera entidad tiene una relación uno a muchos (\*) lo que indica que la entidad 1 puede estar asociada a más de un valor de la entidad 2, pero los valores de la entidad 2 se asocian a solo uno valor de la entidad 1.



**Figura 23.** Ejemplo Modelo Entidad – Relación.

Por otra parte, el MR utiliza tablas para representar las entidades y las columnas para los atributos y estos a su vez pueden fungir como clave única para las entidades. En la Figura 24 se muestra un ejemplo de dos entidades donde la primera asigna el atributo A como clave y lo asocia al atributo G de la segunda entidad

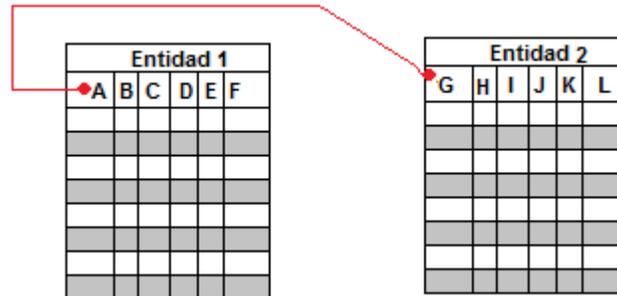


Figura 24. Ejemplo del modelo relacional.

#### 4.5.5 JavaScript

JavaScript es un lenguaje de programación interpretado del lado del cliente por los navegadores web y es utilizado para la creación de sitios web dinámicos, donde se incorporan efectos y animaciones a textos, imágenes u objetos HTML, así mismo permite activar eventos sobre formularios para envío de peticiones al SW. Una ventaja de JavaScript es que existen secciones de código llamadas bibliotecas para la manipulación de objetos, lo que ahorra tiempo de programación y permite a usuarios con mínimos conocimientos de JavaScript poder realizar páginas web sofisticadas. Entre las bibliotecas más comunes se encuentran Ajax, JQuery y Dojo.



#### 4.6 Información de clima en México.

El Observatorio Meteorológico y Astronómico de México fue creado por decreto presidencial en 1877 por el presidente de la república Porfirio Díaz y por iniciativa del entonces Ministro de Fomento Vicente Riva Palacio, iniciando operaciones formalmente el 6 de marzo de 1877 en la azotea de Palacio Nacional, en ese entonces dependió de la Comisión Geográfica Exploradora del Territorio Nacional y para 1878 fue trasladado al castillo de Chapultepec donde más tarde se independizó de la Comisión Geográfica quedando bajo la dirección del Ingeniero Mariano Bárcena. Las principales funciones encomendadas al meteorológico nacional fueron la de apoyar a la planificación a corto y mediano plazo mediante observaciones y procesamiento de información meteorológica y climatológica. La transmisión de datos meteorológicos de forma simultánea fue posible gracias al telégrafo inventado por Samuel Morse. En 1883 el Meteorológico y Observatorio Astronómico fueron trasladados al edificio del ex-Arzobispado en Tacubaya donde residen actualmente. Dentro de las metas del Ing. Bárcena fue la de proponer y conformar la red nacional de estaciones meteorológicas con un total de 46 observatorios en todo el país, 10 para el litoral del Golfo, 10 para el del Pacífico y el resto para las capitales de los estados, pero para 1879 solo se contaban con 21 estaciones de las cuales solo 13 contaban con registros diarios.

Como Bárcenas no contaba con presupuesto para sueldos de operarios de las estaciones meteorológicas, propuso que al igual que en Estados Unidos, los operadores de las casetas telegráficas tomaran las lecturas del clima, esto permitió que para 1882 se tenían 191 oficinas telegráficas para el estudio del tiempo, sin embargo por la falta de instrumentos elementales no se registraban muchas variables de manera confiable, salvo la precipitación dada la facilidad de contar con pluviómetros y de capacitar al personal en su uso.



Por decreto presidencial en 1901 el nombre del Observatorio Meteorológico se cambió a Servicio Meteorológico Nacional (SMN), para ese entonces contaba con 31 estaciones meteorológicas y 18 observatorios así como estaciones independientes cuya envío de datos fue mediante el telégrafo.

Para 1989 el SMN en paso a ser parte de la Comisión Nacional del Agua de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Actualmente el SMN es el mayor proveedor de información de clima (Figura 25) gracias a la gran cantidad de estaciones climatológicas, que en 2013 contaba con 3153 estaciones climatológicas en operación (CONAGUA, 2014), cabe señalar que estas estaciones presentan un retraso entre la lectura y disponibilidad de más de un año. Por otra parte la CONAGUA puso en marcha 642 Estaciones Meteorológicas Automatizadas (EMA) las cuales son administradas por el SMN, Organismos de cuenca, protección civil de algunos estados, UNAM y la SEMAR (Figura 26) y reportan datos de clima varias veces al día y es posible consultarlas en Internet, lo que las hace confiables para situaciones donde la lectura de datos de clima es requerida en tiempo real como en protección civil, monitoreo de heladas, inundaciones, entre otros.

Por otra parte hay instituciones de investigación y/o educativas que cuentan con estaciones meteorológicas y proveen datos de clima como el INIFAP que en 2006 puso en marcha 1198 estaciones meteorológicas automáticas (Figura 27) y cuyos datos se pueden consultar en línea. Del mismo modo pero con un menor número de estaciones la UNAM, CHAPINGO y CIMMYT.

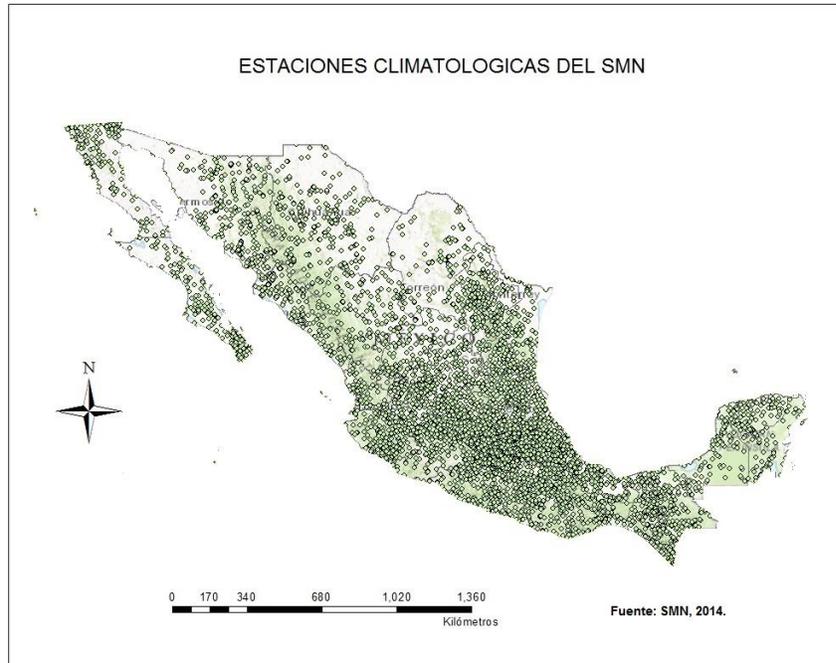


Figura 25. Localización de las estaciones climatológicas del SMN.

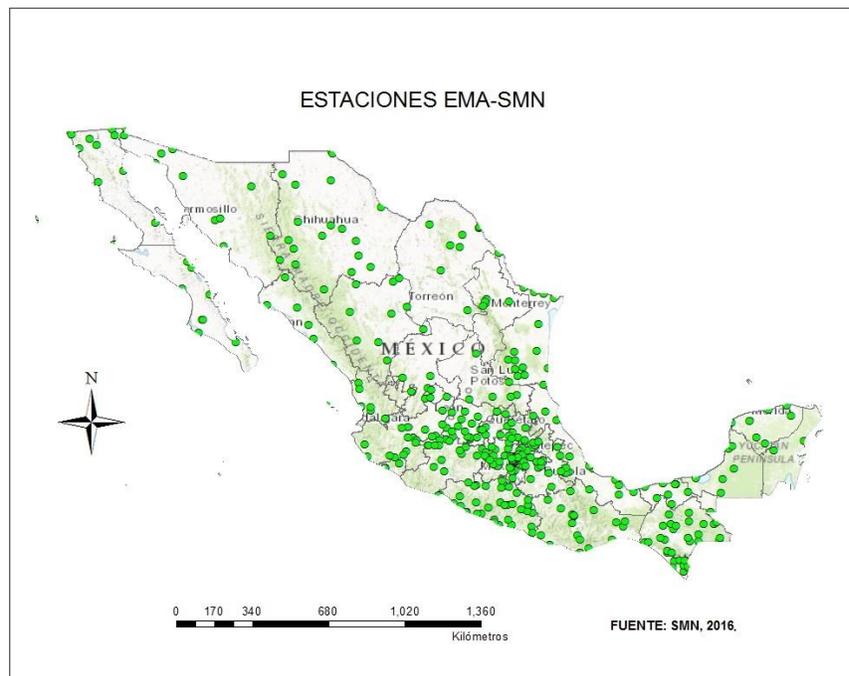
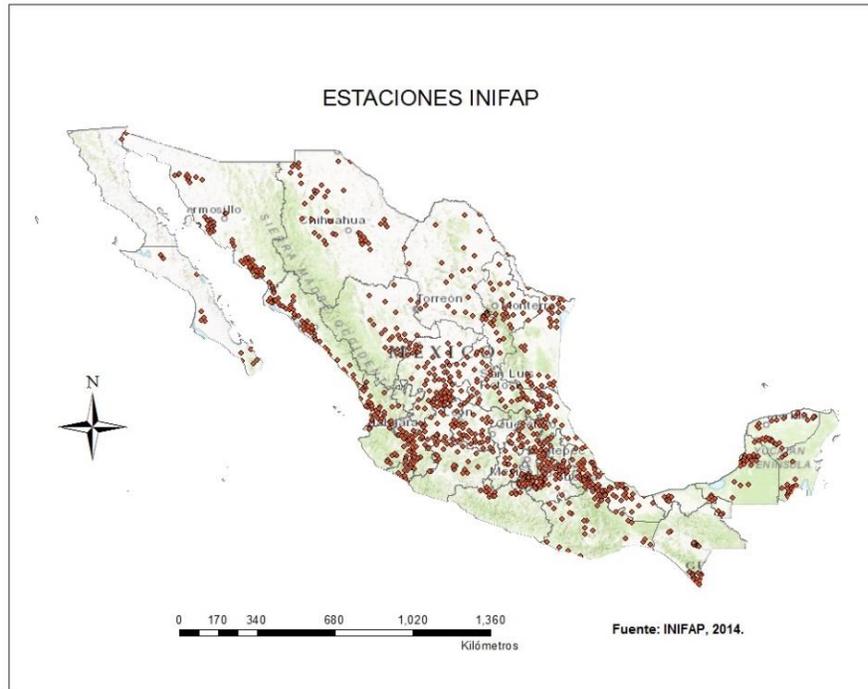


Figura 26. Estaciones meteorológicas automáticas (EMA) del SMN.



**Figura 27.** Estaciones meteorológicas de INIFAP.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología utilizada para lograr los objetivos planteados en el presente trabajo, se constituye de las siguientes fases:

- Búsqueda, depuración y análisis de información de fechas de siembra para accesiones de maíz (ver apartado 5.1).
- Recopilación, formato, procesamiento y almacenamiento en base de datos de información climatológica (ver apartado 5.2).
- Generación de modelos fenológicos para las accesiones consideradas (ver apartado 5.3).
- Desarrollo de un algoritmo de interpolación y ajustarlo al gradiente térmico altitudinal (ver apartado 5.4).
- Selección de la plataforma informática (ver apartado 5.5).
- Diseño, programación y puesta en línea, de interfaces del Sistema de Información Geográfico (SIG) (ver apartado 5.6).

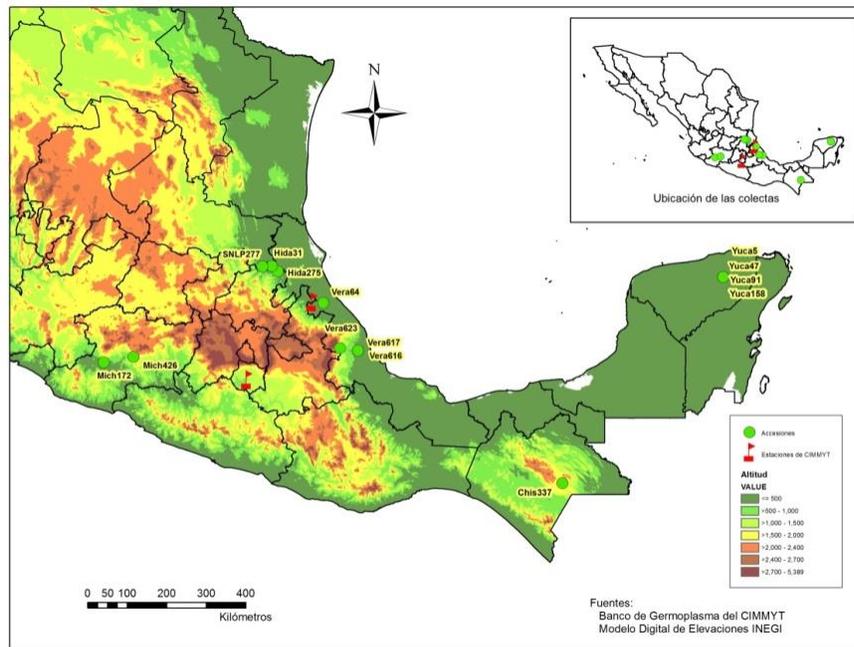
El desarrollo de cada una de estas fases se describe a continuación.

### 5.1 Búsqueda, depuración y análisis de información de fechas de siembra para accesiones de maíz

En este trabajo se utilizó información de fechas de siembra y floración de 3142 accesiones de maíz (descritas en el capítulo 4.2). Se realizó una depuración de fechas de siembra, descartando las que presentaron mayor diferencia en la temperatura promedio del periodo de Siembra a Floración con respecto al de las demás fechas y finalmente se seleccionaron 14 accesiones cuyos sitios de origen (Figura 28) son los estados de: Chiapas (CHIS), Hidalgo (HIDA), Michoacán (MICH), San Luis Potosí (SLP), Veracruz (VERA) y Yucatán (YUCA), y los años de colecta son: 1952, 1972, 1978 y 2007 (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Origen de las accesiones de maíz.

Accesión	Latitud, Longitud	Altitud (msnm)	Municipio	Localidad	Colecta
CHIS337	16.33 N, -91.94 W	1494		Margaritas	01/Ene/72
HIDA31	21.15 N, 98.41 W	210	Huejutla, Hgo.	Huejutla	24/Ene/52
HIDA275	21.27 N, 98.55 W	140	San Felipe O.	Piedra Hincada	6/5/2007
MICH172	19.08 N, 102.37 W	302		Apatzingan	04/Feb/52
MICH426	19.20 N, 101.70 W	1900		Ario de Rosales	
SNLP277	21.25 N, 98.76 W	440	Tamazunchale	Guaxcuaco	8/17/2007
VERA64	20.43 N, 97.38 W	304	Papantla	El Tajin	
VERA616	19.35 N, 96.59 W			Rafael Lucio	
VERA617	19.35 N, 96.59 W	1800		Rafael Lucio	1/1/1977
VERA623	19.4 N, 97 W	1760		Tlacolulan	
YUCA5	21.01 N, 88.28 W	30		Espita	
YUCA47	21.017 N, -88.28 W	23		Espita	
YUCA91	21.017 N, -88.28 W	28		Espita	01/Ene/78
YUCA158	21.017 N, -88.28 W	23		Espita	



**Figura 28.** Localización de las estaciones de CIMMYT y sitios de colecta.



Las estaciones de CIMMYT donde se realizaron las siembras son Tlaltizapan y Agua Fría, en los años 2009, 2011, 2012, 2013 y 2014 (Cuadro 5)

**Cuadro 5.** Fechas de siembra y temperatura media del periodo Siembra-Floración.

Lugar de siembra	Accesión	Fecha de siembra	Fecha de floración	Temperatura media
Tlaltizapan	CHIS337	16-Jun-11	3-Sep-11	24.75
Tlaltizapan	CHIS337	19-Jun-12	5-Sep-12	23.49
Tlaltizapan	CHIS337	14-Nov-12	14-Mar-13	20.87
Tlaltizapan	CHIS337	28-Nov-13	11-Mar-14	21.28
Agua Fría	HIDA31	8-Jun-11	12-Aug-11	28.89
Agua Fría	HIDA31	31-May-12	6-Aug-12	26.51
Agua Fría	HIDA31	14-Nov-12	11-Feb-13	20.03
Tlaltizapan	HIDA275	28-Nov-08	4-Apr-09	21.49
Agua Fría	HIDA275	4-Jun-09	24-Aug-09	29.54
Tlaltizapan	HIDA275	14-Nov-12	19-Mar-13	20.84
Tlaltizapan	HIDA275	20-Apr-13	13-Jul-13	25.73
Agua Fría	HIDA275	8-Jul-14	26-Sep-14	27.83
Agua Fría	MICH172	8-Jun-11	9-Aug-11	28.77
Agua Fría	MICH172	27-Oct-11	30-Jan-12	19.73
Agua Fría	MICH172	31-May-12	6-Aug-12	26.51
Tlaltizapan	MICH426	16-Jun-11	3-Sep-11	24.75
Tlaltizapan	MICH426	19-Jun-12	4-Sep-12	23.49
Tlaltizapan	MICH426	14-Nov-12	4-Mar-13	20.72
Tlaltizapan	MICH426	28-Nov-13	3-Mar-14	21.03
Tlaltizapan	SNLP277	28-Nov-08	20-Mar-09	21.09
Agua Fría	SNLP277	4-Jun-09	11-Aug-09	29.61
Tlaltizapan	SNLP277	14-Nov-12	10-Mar-13	20.76
Tlaltizapan	SNLP277	28-Nov-13	10-Mar-14	21.25
Agua Fría	VERA64	8-Jun-11	5-Aug-11	28.76
Tlaltizapan	VERA64	14-Nov-12	21-Feb-13	20.50
Tlaltizapan	VERA64	28-Nov-13	4-Mar-14	21.07
Tlaltizapan	VERA616	16-Jun-11	2-Sep-11	24.79
Tlaltizapan	VERA616	19-Jun-12	1-Sep-12	23.49
Tlaltizapan	VERA616	14-Nov-12	28-Feb-13	20.63
Tlaltizapan	VERA616	28-Nov-13	7-Mar-14	21.17
Tlaltizapan	VERA617	16-Jun-11	29-Aug-11	24.81

**Cuadro 5.** Fechas de siembra y temperatura media del periodo Siembra-Floración.

Lugar de siembra	Accesión	Fecha de siembra	Fecha de floración	Temperatura media
Tlaltizapan	VERA617	17-Jul-12	29-Sep-12	23.34
Tlaltizapan	VERA617	14-Nov-12	25-Feb-13	20.57
Tlaltizapan	VERA617	28-Nov-13	4-Mar-14	21.07
Tlaltizapan	VERA623	16-Jun-11	2-Sep-11	24.79
Tlaltizapan	VERA623	14-Nov-12	3-Mar-13	20.74
Tlaltizapan	VERA623	28-Nov-13	8-Mar-14	21.21
Agua Fría	YUCA5	8-Jun-11	4-Aug-11	28.76
Tlaltizapan	YUCA5	14-Nov-12	10-Feb-13	20.04
Agua Fría	YUCA5	8-Jul-14	4-Sep-14	28.08
Agua Fría	YUCA47	31-May-12	13-Aug-12	26.44
Tlaltizapan	YUCA47	14-Nov-12	15-Mar-13	20.89
Tlaltizapan	YUCA47	28-Nov-13	20-Mar-14	21.59
Agua Fría	YUCA91	31-May-12	11-Aug-12	26.47
Tlaltizapan	YUCA91	14-Nov-12	14-Mar-13	20.87
Tlaltizapan	YUCA91	28-Nov-13	18-Mar-14	21.51
Agua Fría	YUCA158	31-May-12	14-Aug-12	26.414
Tlaltizapan	YUCA158	14-Nov-12	22-Mar-13	20.90
Tlaltizapan	YUCA158	28-Nov-13	18-Mar-14	21.51

## 5.2 Recopilación, formato, procesamiento y almacenamiento en base de datos de información climatológica

Se consultó y recopiló información de clima a partir del 2014 de 97 estaciones EMA (descritas en el capítulo 4.6) del SMN, localizadas en los estados de: Ciudad de México, Estado de México, Hidalgo, Puebla, Querétaro y Tlaxcala.

Se desarrolló un programa en PHP para la lectura, formato y almacenamiento en base de datos, de la información climatológica (Figura 29).

```
LeyendoArchivosEmas.php x
139 switch($i)
140 {
141     case 0:
142         $scad.= "".$ArregloDeDatos[$j][$i][2]."".",".".".".$ArregloDeDatos[$j][$i][1]."".",".".".".$ArregloDeDatos[$j][$i][0]."  
>";
143         //echo $ArregloDeDatos[$j][$i][2].",".$ArregloDeDatos[$j][$i][1].",".$ArregloDeDatos[$j][$i][0]."  
>";
144         break;
145     case 1:
146         $scad.= "".$ArregloDeDatos[$j][$i][0]."".",".".".".$ArregloDeDatos[$j][$i][1]."";
147         // echo $ArregloDeDatos[$j][$i][0].",".$ArregloDeDatos[$j][$i][1]."  
>";
148         break;
149     default:
150         $scad.= "".$trim($ArregloDeDatos[$j][$i])."";
151
152 } //switch($i)
153 if ($i<count($fila)-1) {$scad.=",";}
154
155 } //for ($i=0;$i<count($ArregloDeDatos[$j]);$i++)
156 $scad.=")";
157 //echo $scad."  
>";
158
159 $sql=$scad;
160 //echo "SQL: ".$sql."  
>";
161 require ("includes\conexion2.php");
162
163 $resultado = mysql_query($sql,$link2);
164
165 } //for ($j=0;$j<count($ArregloDeDatos);$j++)
166
167 $TablasProcesadas++;
168 echo "Tablas procesadas: ".$TablasProcesadas."  
>";
169 } //function LeeArchivoYGrabalo($Estacion)
170
171 echo "FIN DEL PROCESO";
172 ?>
```

**Figura 29.** Programa para la lectura, formato y almacenamiento en información climática

### 5.3 Generación de modelos fenológicos para las accesiones consideradas

En el presente trabajo se consideró el crecimiento lineal (descrito en el capítulo 4.2) existente entre la temperatura base ( $T_b$ ) y la temperatura óptima (Ver Figura 1 del capítulo 4.2) entre las etapas fenológicas de siembra y floración. Para generar los modelos se utilizaron las ecuaciones 1, 2 y 3.

Para realizar las regresiones lineales se utilizaron los promedios de temperatura para los periodos fecha – floración y el inverso de la duración en días de dichos periodos para 41 accesiones de maíz.

#### 5.4 Desarrollo de un algoritmo de interpolación y ajustarlo al gradiente térmico altitudinal.

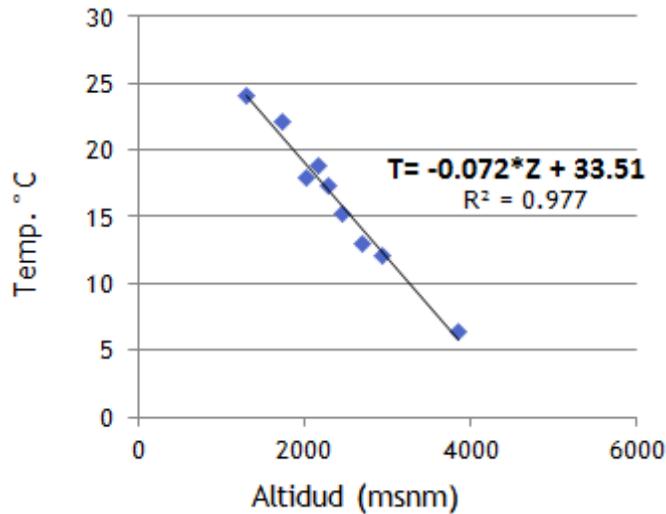
Para conocer las distancias entre las parcelas y las estaciones y así poder seleccionar las estaciones más cercanas, se utilizó la Ecuación 4 de Harversine descrita en el capítulo 4.3.6, posteriormente con los datos de temperatura y altitud (Cuadro 5) se realizó la regresión lineal para conocer el gradiente térmico (Figura 30) utilizado para ajustar las temperaturas durante la interpolación.

Con la finalidad de calibrar el sistema, se seleccionó un sitio localizado en las coordenadas 18.75031° latitud norte y 98.041990° longitud oeste y una altitud de 1652.58 m, el sitio corresponde a una parcela cuya siembra se llevó a cabo el día 23 de abril del 2014. Se calculó la temperatura promedio de la parcela utilizando las diez estaciones meteorológicas más cercanas y se consideró el gradiente térmico altitudinal. El Cuadro 6 muestra las estaciones más cercanas, la distancia a la parcela, altitud y temperatura promedio registrada.

**Cuadro 6.** Datos de temperatura para calcular el gradiente térmico.

Estación	Distancia	Altitud	Temperatura
Puebla_Pue	35.812	2178	18.8
Uttecamachalc_Pue	36.103	2025	17.9
La_Malinche_II	43.436	2707	12.95
Izucar_Matam_Pue	45.668	1306	24.05
La_Malinche_I_Tlax	60.845	2929	12.1499
Tehuacan_Pue	66.053	1732	22.05
Tlaxcala_Tlax	66.11	2301	17.3
Huamantla_Tlax	71.143	2456	15.15
Altzomoni_Mex	76.382	3851	6.45

La Figura 26 muestra el modelo lineal para el cálculo del gradiente térmico altitudinal



**Figura 30.** Modelo lineal para temperatura y altitud.

Con el gradiente térmico se extrapolaron los valores de temperatura a la misma altitud del sitio (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Valores de temperatura extrapolados a la misma altitud

Estación	Distancia	Altitud	Temperatura misma Altitud
Puebla_Pue	35.812	2178	22.583024
Uttecamachalc_Pue	36.103	2025	20.581424
La_Malinche_II	43.436	2707	20.541824
Izucar_Matam_Pue	45.668	1306	21.554624
La_Malinche_I_Tlax	60.845	2929	21.340124
Tehuacan_Pue	66.053	1732	22.621824
Tlaxcala_Tlax	66.11	2301	21.968624
Huamantla_Tlax	71.143	2456	20.934624
Altzomoni_Mex	76.382	3851	22.278624



Por último, se realizó la interpolación por un método conocido, para este ejemplo se empleó el método del inverso al cuadrado de las distancias (Ecuaciones 7 y 8).

$$W_i = \frac{(d_i)^2}{\sum_{i=1}^n (d_i^2)} \quad \text{Ecuación 7.}$$

$$T_{sitio} = \sum_{i=1}^n (T_i * W_i) \quad \text{Ecuación 8.}$$

Donde:

$W_i$  = peso que indica la influencia de la estación  $i$  sobre el sitio, adimensional.

$d_i$  = distancia que existe entre la estación  $i$  y el sitio.

$n$  = número de estaciones cercanas al sitio (en este ejemplo 10).

$T_i$  = temperatura de la estación  $i$ .

$T_{sitio}$  = temperatura interpolada del sitio.

El resultado de la temperatura promedio del sitio de este ejemplo es igual a 22.68 °C.

## 5.5 Selección de la plataforma informática.

Por la existencia de Software con licencia sin costo y la vasta documentación disponible en Internet, se seleccionaron los siguientes Software libres: Apache en la versión 2.4.6 a 32 bits, PHP versión 5.4.19 y MySQL versión 5.0.10.

Para la comunicación entre el servidor del sistema SIG y los usuarios vía HTTP, se configuro el puerto 8080, lo que evita posibles conflictos con el puerto 80, comúnmente utilizado por servidores Web.

Para la comunicación entre MySQL y PHP se habilito el puerto 3306 comúnmente recomendado, además cuenta con información en línea sobre como activarlo y agregarlo a distintos Firewalls. El servicio de mapas utilizado es el de Google Maps API v3 en JavaScript.



## **5.6 Diseño, programación y puesta en línea, de interfaces del Sistema de Información Geográfico (SIG).**

Con la finalidad de tener compatibilidad con la mayoría de los navegadores de Internet, se seleccionó el lenguaje HTML y JavaScript para la programación de las interfaces del sistema, evitando librerías facilitadoras de código que si bien ahorran tiempo en el diseño, también incrementan el uso de memoria requerido por el sistema.

Para evitar confusión por parte de los usuarios, el diseño de la interfaz principal consta de tres partes la primera muestra los datos de parcelas y cultivos, la segunda el mapa con ubicación de estaciones meteorológicas y de la parcela y la tercera los resultados que incluyen: las 10 estaciones meteorológicas más cercanas a la parcela, temperatura promedio y GDD calculados diariamente desde la fecha de siembra hasta la madures fisiológica y el cálculo de fechas mínimas diarias para todo el año de siembra lo que permitirá visualizar el periodo libre de heladas. Adicionalmente contiene enlaces a sub – interfaces para registro de usuarios y parcelas.



## 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se generaron modelos fenológicos para 14 accesiones de maíz, se creó una base de datos de meteorológicos y se desarrolló un Sistema de Información Geográfico en línea para el cálculo de los GDD en parcelas localizadas en la región de Valles Altos. Se desarrolló una sección para registrar usuarios y parcelas así como accesiones sembradas, fecha de siembra y coordenadas geográficas de la parcela.

El diseño de la base de datos incluye el modelo Entidad-Relación (E-R) y modelo Relacional (MR) descritos en el capítulo 4.5.4.

Por último en el Anexo 1 se describe la interfaz gráfica del sistema así como la instalación del mismo.

### 6.1 Modelos fenológicos

Los parámetros de regresión de los modelos fenológicos, se muestran en el Cuadro 8 donde se puede observar variaciones de  $T_b$  que van desde  $-2.3\text{ °C}$  hasta  $13\text{ °C}$  y coeficientes de correlación mayores a 0.82. El valor mínimo de GDD es para a accesión CHIS337 con 880.85 y el mayor para HIDA31 con 2041.95 GDD. Para el caso de YUCA5 se obtuvo el valor  $T_b=5.05\text{ °C}$  el cual difiere con respecto a las accesiones colectadas en la región donde el  $T_b$  oscila los  $12\text{ °C}$  y que es similar a  $5\text{ °C}$  reportada para las razas palomero tipo Chihuahua, palomero toluqueño y arrocillo (Ruiz, 1998), esta diferencia sugiere que YUCA5 proviene de alguna región más fría y que se ha adaptado al lugar donde se colectó o bien que se cometieron errores en el registro de fechas de siembra.

La accesión MICH172 presenta un  $T_b$  de 2.86 ° similar a la encontrada por Ruiz (1998) para la raza cónica con  $T_b$  de 2 ° C. Por otra parte, se calculó  $T_b = 7.23$  °C para la accesión HIDA275, este valor es similar al reportado por Hernández y Carballo (1984) para Valles Altos. La  $T_b = 9.37$  °C de la accesión MICH426 coincide con la reportada  $T_b = 9.4$  °C para el híbrido H-311 (Ruiz *et al.*, 2000).

**Cuadro 8.** Parámetros de regresión, temperaturas base y GDD, para las accesiones de Maíz.

Accesión	$\alpha$	$\beta$	$r^2$	$T_b$	GDD
CHIS337	0.00113526	-0.014775	0.88	13.01	880.85
HIDA31	0.00050938	0.00118937	0.95	-2.33	2041.95
HIDA275	0.00058960	-0.0042653	0.91	7.23	1696.05
MICH172	0.00062599	-0.0017914	0.99	2.86	1597.48
MICH426	0.00086195	-0.0080739	0.83	9.37	1160.15
SNLP277	0.0006552	-0.0046727	0.98	7.13	1526.24
VERA64	0.0008743	-0.0079089	0.99	9.05	1143.78
VERA616	0.00093642	-0.0096216	0.84	10.27	1067.89
VERA617	0.00096652	-0.0099080	0.91	10.25	1034.64
VERA623	0.00085814	-0.0084257	0.99	9.82	1165.30
YUCA5	0.00074281	-0.0037548	0.99	5.05	1346.24
YUCA47	0.00094535	-0.01148306	0.99	12.15	1057.81
YUCA91	0.00098333	-0.01213178	0.99	12.34	1016.95
YUCA158	0.00094939	-0.0117027	0.98	12.33	1053.31

Las Figuras 31, 32 y 33 muestran la forma de los modelos lineales de las accesiones, en dichas graficas es posible apreciar el punto donde las rectas cruzan el eje de las temperaturas (eje X), que es precisamente la temperatura base ( $T_b$ ). Las pendientes de las rectas permiten definir a las accesiones como cultivos de duración corta (mayor pendiente) o tardía (menor pendiente).

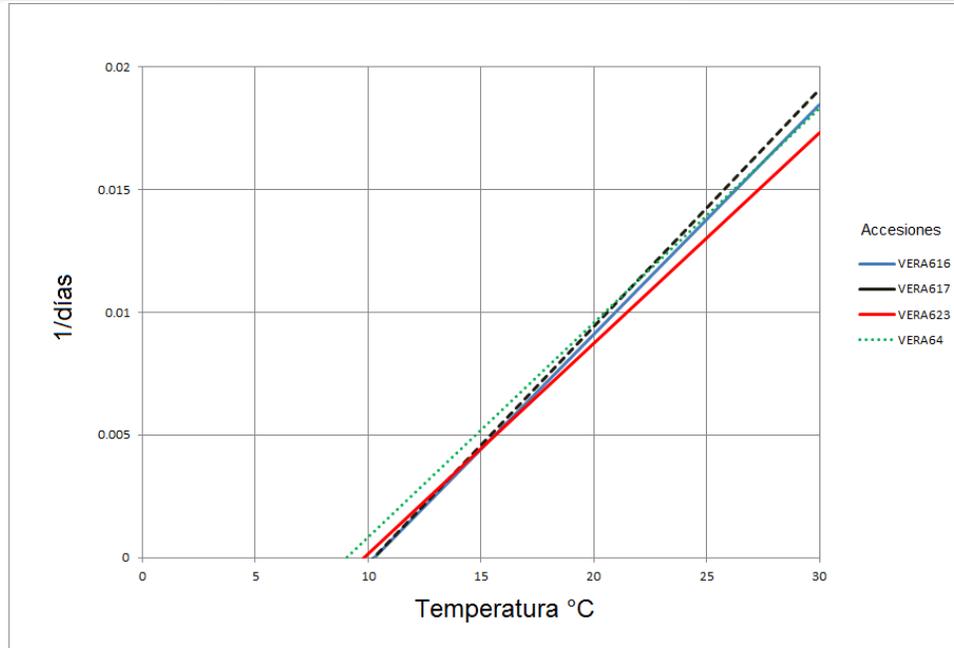


Figura 31. Modelos lineales para las accesiones Vera64, Vera616, Vera617 y Vera623, de Maíz.

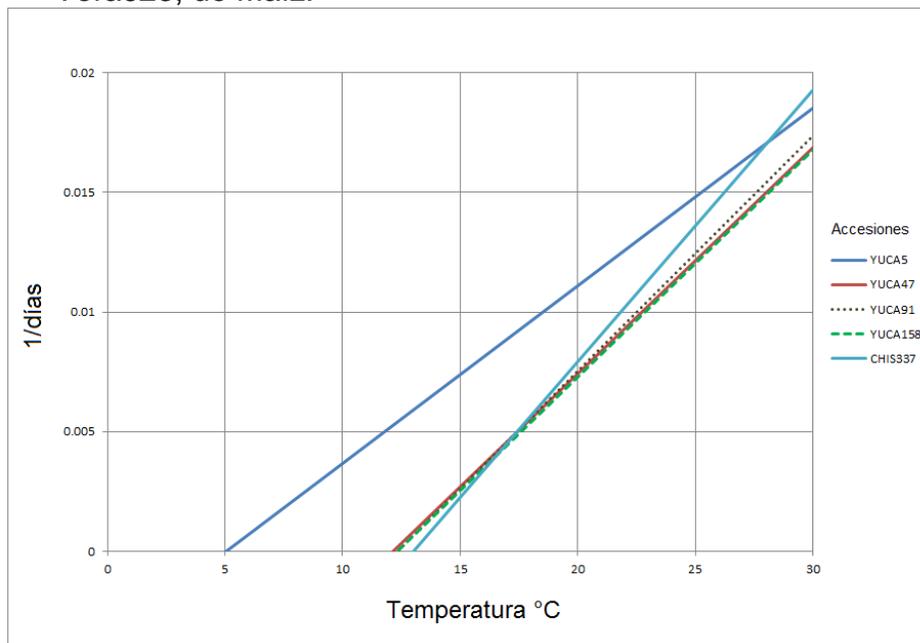
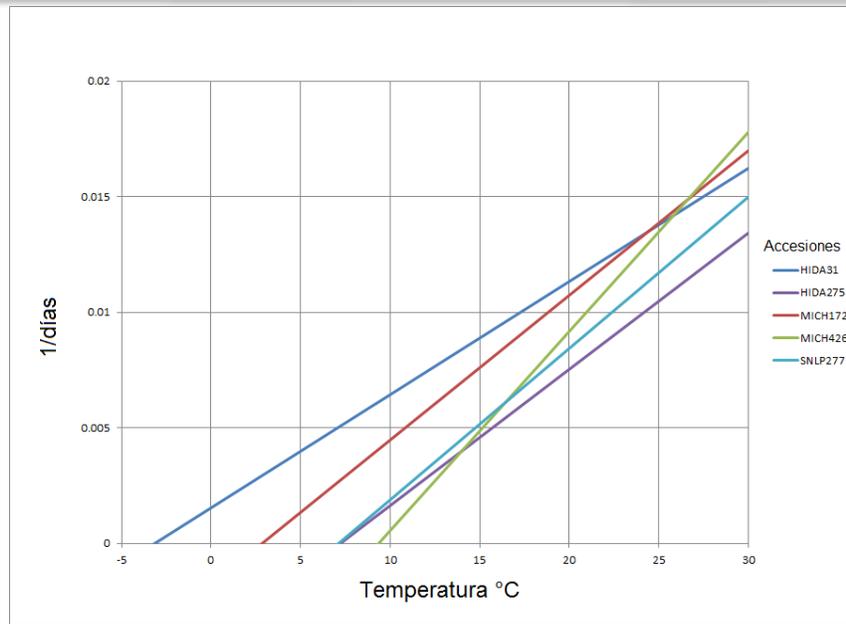
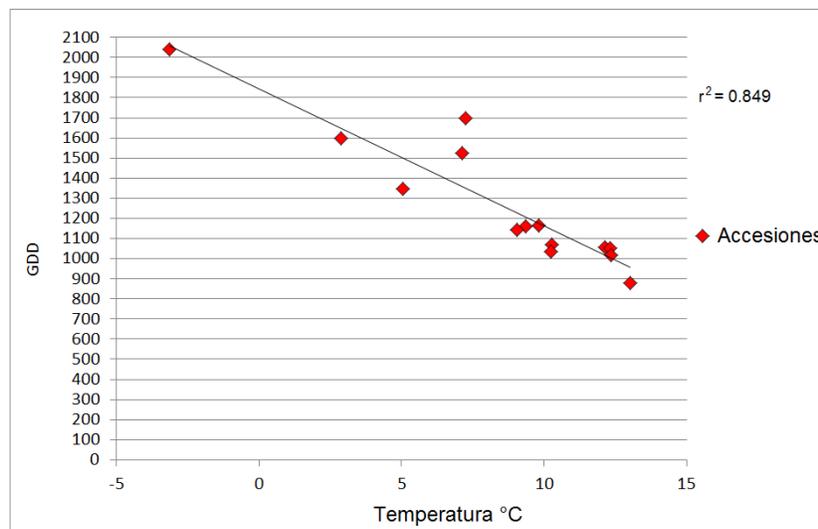


Figura 32. Modelos lineales para las accesiones Yuca5, Yuca47, Yuca91, Yuca158 y Chis337, de Maíz.



**Figura 33.** Modelos lineales para las accesiones Hida31, Hida275, Mich172, Mich426, Snlp277, de Maíz.

Por otra parte, y a manera de visualizar la relación que existe entre la temperatura base de las accesiones y los GDD (necesarios para cumplir el cambio de fase de siembra a floración) para diferentes accesiones, se realizó la Figura 34 donde se observa que a menor temperatura base las plantas requieren mayor energía térmica.



**Figura 34.** Relación entre  $T_b$  y GDD para diferentes accesiones de Maíz.

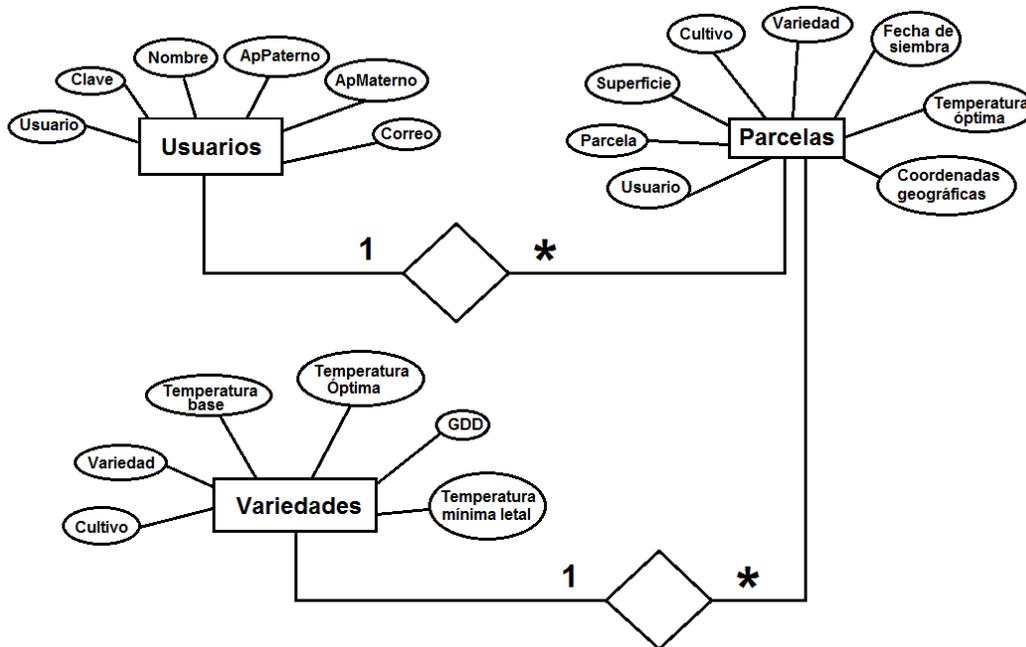


## 6.2 Desarrollo del sistema SIG

Durante el desarrollo del sistema de la presente investigación, se realizaron los modelos entidad –relación y relacional para definir la estructura de los datos de usuarios, parcelas, accesiones y clima. Posteriormente se seleccionó Apache como servidor web sobre un sistema operativo Windows, PHP como intérprete de código para páginas Web y MySQL como el sistema gestor de bases de datos y finalmente se describe la interfaz del sistema descrito en el Anexo 1.

### 6.2.1 Modelo Entidad – Relación (E-R)

El cálculo de los GDD se realiza en el cultivo de una parcela cuyo manejo agrícola es administrada por algún usuario que puede ser productor, técnico o investigador, por ello en el modelo E-R se crea la entidad usuaria cuyos atributos son cuenta de usuario, clave de acceso, nombre y correo electrónico. Por otra parte, se creó la entidad Parcelas para registrar las siembras de los usuarios, los atributos de esta entidad son cuenta del usuario, nombre o identificador de la parcela, superficie (ha), cultivo y variedad, temperatura óptima y la ubicación en coordenadas geográficas. Por último, se creó la entidad variedades que es donde se almacenan los modelos fenológicos creados en la presente investigación, los atributos son: nombre del cultivo, variedad, temperatura base y óptima, los GDD requeridos para su completo desarrollo y la temperatura mínima letal del cultivo (Figura 35).



**Figura 35.** Modelo E-R Usuarios, Parcelas y cultivos.

Por otra parte se tiene el modelo E-R para la base de datos de clima, donde se tiene la entidad “Datos de clima”, la cual concentra datos diarios de temperaturas requeridas para el cálculo de los GDD, dichos datos provienen de la entidad “Estaciones de clima”, la cual tiene la ubicación geográfica de las estaciones meteorológicas, dicha ubicación es utilizada para las interpolaciones en superficies esféricas con la fórmula de Harversine (Ecuación 4), así mismo tiene el atributo altitud requerida para el cálculo del gradiente altitudinal (ecuación), por último se tiene el atributo “Archivo fuente de la estación”, este atributo enlaza con la tabla donde se almacenan los datos de clima provenientes de las estaciones EMA del SMN.

Dado que las estaciones EMA reportan distintas variables meteorológicas y frecuencia de lectura, se creó una tabla para cada estación de tal forma que cualquier modificación que sufra o deje de funcionar no afecte al resto y pueda ser fácilmente adaptada en la tabla que le corresponda. Es posible agregar nuevas estaciones de clima con solo crear una tabla que la represente y se enlazaría con

la entidad “Estaciones de clima” de esta forma el algoritmo la considera en la concentración de datos diarios (Figura 36).

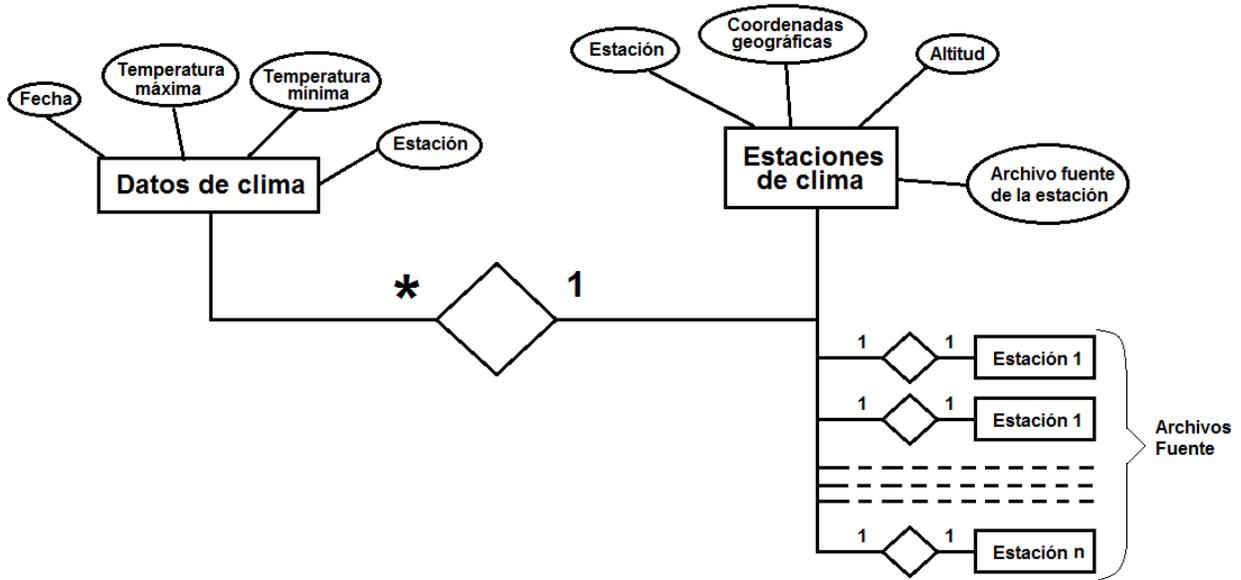


Figura 36. Modelo E-R Datos de clima y fuentes de datos.

### 6.2.2 Modelo Relacional del Sistema (MR)

Se utilizó como base el modelo E-R y se desarrolló el modelo MR, donde se crearon tablas para representar las entidades, dichas tablas fueron definidas dentro del gestor de base de datos MySQL y cuentan con clave principal y definición del tipo de dato por almacenar, así mismo se crearon tablas para catálogos que facilitan la ubicación de las parcelas y no guardan relación con los usuarios o parcelas como son los listados de “Entidades” y “Municipios”, los cuales tienen la propiedad “Zoom” que es un nivel de acercamiento sobre el mapa. Para los datos de clima se crearon las tablas “datos de clima” y “estaciones de clima” y para el seguimiento del cultivo las tablas de “usuario”, “parcelas” y “variedades”, esta última contiene los parámetros de los modelos fenológicos de las accesiones de maíz generadas en la presente investigación (Cuadros 9 a 15).

**Cuadro 9.** Atributos de las entidades.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Id. Estado	char	2
	Nombre del Estado	varchar	50
	Nombre del Estado en formato HTML	varchar	50
	Latitud	doublé	
	Longitud	doublé	
	Zoom	int	

**Cuadro 10.** Atributos de los municipios.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Id. Estado	char	2
	Id. Municipio	char	5
	Nombre del Municipio	varchar	50
	Nombre del Municipio en formato HTML	varchar	50
	Longitud	doublé	
	Latitud	doublé	

**Cuadro 11.** Datos Clima.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Año	int	
	Mes	int	
	Día	doublé	
	Temperatura máxima	doublé	
	Temperatura mínima	doublé	
	Precipitación	doublé	
	Humedad Relativa	doublé	

**Cuadro 12.** Estaciones de clima.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Id. Estación	varchar	20
	Nombre de la estación	varchar	50
	Id. Estado	char	2
	Id. Municipio	char	5
	Nombre de la tabla que define sus campos	varchar	50

**Cuadro 13.** Datos de los usuarios.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Id. Usuario	varchar	20
	Clave de acceso del usuario	varchar	255
	Nombre del usuario	varchar	
	Apellido paterno	varchar	
	Apellido materno	varchar	
	Correo electrónico	varchar	

**Cuadro 14.** Datos de las Parcelas.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Id. Usuario	varchar	20
	Parcela	varchar	20
	Variedad	varchar	50
	Año de siembra	int	
	Mes de siembra	int	
	Día de siembra	int	
	Superficie	doublé	
	Temperatura óptima del cultivo	doublé	

**Cuadro 14.** Datos de las Parcelas.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Latitud	doublé	
	Longitud	doublé	

**Cuadro 15.** Variedades de las accesiones.

Clave	Atributo	Tipo dato	Longitud
	Variedad	varchar	50
	Temperatura base	doublé	
	Temperatura óptima del cultivo	doublé	
	Grados días de desarrollo del cultivo	int	
	Temperatura mínima letal del cultivo	doublé	

### 6.3 Gradiente térmico altitudinal

El gradiente térmico altitudinal para Valles Altos, presento alta correlación de forma similar al gradiente altitudinal para la humedad atmosférica obtenida por Fries, *et al.* (2012).

Se utilizaron estaciones meteorológicas distanciadas de la parcela de hasta 70 km, obteniéndose gran correlación, por lo que se considera un método confiable para ajustar temperaturas en función de la elevación, no obstante sería conveniente calcular dicho gradiente en el barlovento de las cadenas montañosas cercanas al mar y verificar si se mantiene buena correlación.



## 7. CONCLUSIONES

A partir de las hipótesis que se plantearon en esta investigación se llegaron a las siguientes conclusiones

Se generó el Sistema de Información Geográfico (SIG) en línea, que facilita la toma de decisiones, es decir evalúa el establecimiento (siembra) y duración (a cosecha) de las diferentes variedades de maíz (accesiones) a partir de los requerimientos térmicos y la oferta de los sitio (parcelas), considerando la variación temporal (durante el año) de cada sitio.

Se desarrollaron los modelos fenológicos de 14 variedades de maíz (accesiones en este caso) donde la  $T_b$  osciló entre -2.3 y 12.1 con requerimientos que varían entre 800 y 2041 GDD, donde nueve accesiones la  $T_b$  osciló entre 9 y 13, por lo que existe una variabilidad en los requerimientos de  $T_b$  y GDD entre las accesiones recolectadas por el CIMMYT, modelos que se incluyeron en el SIG.

Los modelos fenológicos, permiten calcular de manera confiable, la duración del ciclo agrícola en cualquier sitio donde se disponga de información meteorológica y de altitud. Conociendo la duración del ciclo es posible ajustar la fecha de siembra óptima para evitar periodos de: heladas, plagas y enfermedades, y precios bajos del mercado.

Se diseñó la base de datos que permite editar, adicionar o actualizar información de forma rápida y segura y no requiere modificaciones del sistema. Si se contempla el tipo de información que contendrá la base de datos, se puede dividir en secciones para poder almacenar información de distinta índole como información de meteorológica, parámetros de modelos fenológicos, etc.



## 8. RECOMENDACIONES

Algunas mejoras que se pueden hacer al sistema desarrollado son:

- Realizar conexión de la base de datos del SIG aun servicio automático que proporcione datos de clima en tiempo real como el del SMN, para evitar descarga, formato e integración al sistema SIG.
- Buscar y agregar modelos fenológicos generados por distintos autores como los generados por Ruiz (1998) y Hernández y Carballo (1984).
- Agregar capa espacial edafológica para descartar regiones no aptas para cultivos.
- Agregar capa espacial de precipitación, para considerar el periodo óptimo de lluvias en el establecimiento de las fechas de siembra.



## 9. LITERATURA CITADA

- Ahn, L., Blum, M., Hopper, N. J., & Langford, J. 2003. CAPTCHA: Using hard AI problems for security. In *International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques*. Springer Berlin Heidelberg. 294-311.
- Birch, C. J., Hammer, G. L., & Rickert, K. G. (1998). Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L.) from emergence to tassel initiation. *Field Crops Research*, 55(1), 93-107.
- Cerf, V.; Dalal, Y. & Sunshine, C. 1974. Specification of internet transmission control program (No. RFC 675).
- Comisión Nacional del Agua. 2014. Atlas del agua en México 2014. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Confalone, A.; Lizaso, J. I.; Ruiz-Nogueira, B.; López-Cedrón, F. X. and Sau, F. 2010. Growth, PAR use efficiency, and yield components of field-grown *Vicia faba* L. under different temperature and photoperiod regimes. *Field Crops Research*. 115(2):140-148.
- Cross, H. Z. and Zuber, M. S. 1972. Prediction of flowering dates in maize based on different methods of estimating thermal units. *Agron. J.* 64(3): 351-355.
- Datos climáticos diarios del CLICOM del SMN con gráficas del CICESE* (<http://clicom-mex.cicese.mx>)
- Ellis, R. H.; Summerfield, R. J.; Edmeades, G. O. and Roberts, E. H. 1992. *Photoperiod, Temperature, and the Interval from Sowing to Tassel Initiation in Diverse Cultivars of Maize*. *Crop. Sci.* 32(5):1225-1232.
- Fernández-Coppel, I. A. 2001. El DATUM. Notas de cartografía. Universidad de Valladolid, Palencia. España. 25pp.



- Fries, A.; Rollenbeck, R.; Nauß, T.; Peters, T., & Bendix, J. 2012. Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and forest meteorology*, 152, 17-30.
- García-Pacheco, A. D. y López-Castañeda, C. 2002. Temperatura base y tasa de extensión foliar del maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 25(4):381-386.
- Gilmore, E. C. and Rogers, J. S. 1958. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agron. J.* 50(10):611–615.
- GNU Operative System. *La definición de Software Libre*. Link: <http://www.gnu.org/philosophy/free-sw.es.html>. Consultado en Junio, 2016.
- Google Maps. 2016. Google Maps JavaScript API V3. Consultado en 2016 en: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/3.exp/reference?hl=es>
- Hernández, L. A., y Carballo, A. 1984. Caracterización de genotipos de maíz de valles altos por sus requerimientos de unidades calor. *Revista Chapingo*.44:42-48.
- Hou, P.; Liu, Y.; Xie, R.; Ming, B.; Ma, D.; Li, S. and Mei, X. 2014. Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Research*. (158):55-64.
- INIFAP. 2012. Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas. Campo Experimental Pabellón - Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos.
- López Quijado, J. 2010. Domine PHP y MySQL. Editorial Alfaomega. México. 628 pp.
- Monteith, J. L. 1977. Climate. In: *Ecophysiology of tropical crops*. T. Alvim and T. T. Kozlowski (eds.). Academic Press. New York. 1-25 pp.
- Mwemezi, J. J., & Huang, Y. (2011). Optimal facility location on spherical surfaces: algorithm and application. *New York Science Journal*, 4(7), 21-28.
- Ojeda B. W., 2001. Sistema de pronóstico de tiempo real SPRITER, versión 2.1, Manual de usuario. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México.



- Ojeda B. W.; Sifuentes, I. E. y Unland W. H. 2006. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*. 40(1): 13-25.
- Olaya, V. 2012. Fundamentos cartográficos y geodésicos. Capítulo 3.
- Rebolledo Martínez, N. 2001. Sistema de pronóstico del riego en tiempo real. Tesis. Instituto Tecnológico de Zacatepec. Zacatepec. Morelos.
- Robert J. Hijmans, 2011. WORLDCLIM Global Climate Data. University of California, Berkeley. EUA.
- Ruiz-Corral, J. A.; Sánchez, J. J. and Goodman, M. M. 1998. Base temperature and heat unit requirement of 49 mexican maize races. *Maydica*. 43(4): 277-282.
- Ruiz Corral, J. A.; Durán Puga, N.; Sánchez González, J. D. J.; Ron Parra, J., González Eguiarte, D. R.; Holland, J. B. and Medina García, G. 2008. Climatic adaptation and ecological descriptors of 42 Mexican maize races. *Crop Science*. 48(4):1502-1512.
- Ruiz Corral, J.A.; López, H. E. F.; Díaz, J. L. R. y Eguiarte, D. R. G. 2000. Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*. 36(5):569-577.
- Silberschatz, A; Korth, H. & Sudarshan, S. 2002. Fundamentos de bases de datos cuarta edición. Editorial. McGraw-Hill/Interamericana de España. Madrid. España.
- TR8350, N. I. M. A. 2000. Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems.
- W3Techs – World Wide Web Technology Surveys.” W3Techs. Consultado en junio, 2016. <http://w3techs.com>.
- Warrington, I. J., and Kanemasu, E. T. 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod. I. Seeding emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agron. J.* 75(5):749-754.
- Wei, P. Y. 1993. Support of In-Document Interactive. Objects in the Viola WWW Browser, Circa May.

## 10. ANEXOS

### A1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SIG

#### A1.1 Interfaz del sistema

La interfaz principal del sistema se divide en tres secciones, la primera contiene el registro, de usuarios y parcelas, así como el catálogo de estados y municipios y el listado de estaciones EMA agrupadas por organismo de cuenca de la CONAGUA. La segunda sección contiene el mapa de Google Maps y la cobertura de las estaciones EMA y el botón de cálculo de los GDD. Por último se tiene la sección de resultados donde se muestran los cálculos de GDD desde la fecha de siembra hasta la fecha de madurez del cultivo; adicionalmente muestra días de heladas, estaciones utilizadas en el cálculo de los GDD y permite descargar los datos en archivo CSV. (Figura 37).

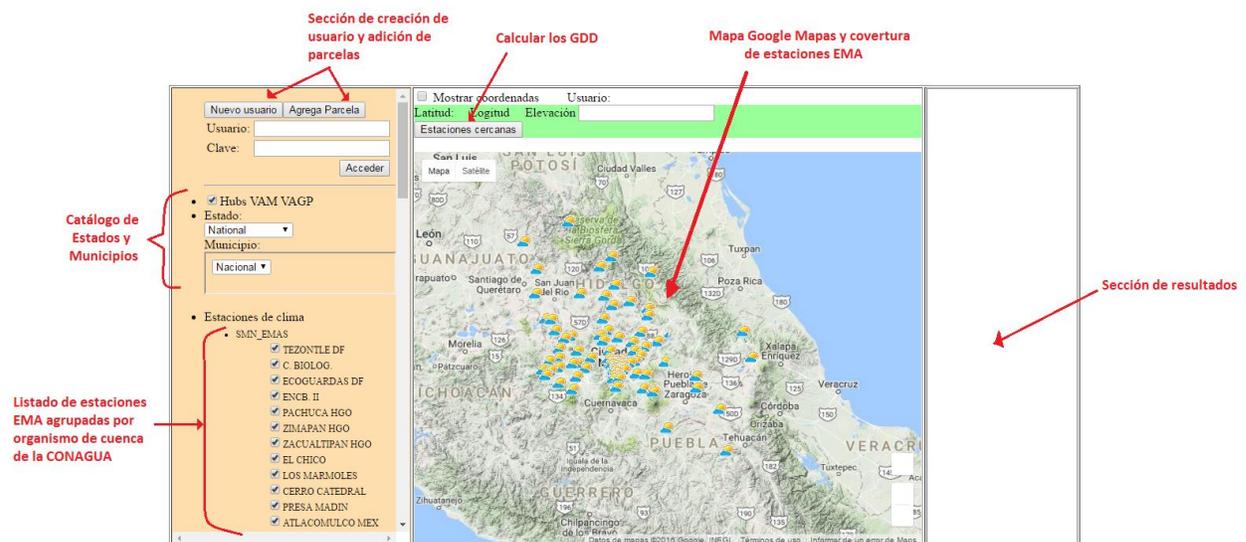


Figura 37. Interfaz principal del sistema.

Para darse de alta al sistema se utiliza el botón **Nuevo usuario** el cual muestra la pantalla de creación de nuevos usuarios (Figura 38), en esta pantalla aparece una cadena alfanumérica aleatoria fusionada en un gráfico con distintas figuras geométricas a manera de ruido llamada palabra CAPTCHA(Completely Automated Public Turing test to tell Computers and Humans Apart), los captchas son utilizados para asegurar que quien se está registrando es humano(Von et al., 2003) y así evitar el registro automático mediante un reconocimiento OCR utilizado por los programas en línea llamados “robots”.

**FORMULARIO DE REGISTRO PARA NUEVOS USUARIOS**

Grafico con la palabra captcha

Escribir la palabra del captcha

Sobrenombre del usuario para entrar a la cuenta

El correo es Opcional

Escribe la palabra:

Nombre:

Apellido Paterno:

Apellido Materno:

Nombre de Usuario:

Clave:

Correo Electronico:

Enviar registro:

**Figura 38.** Registro de nuevos usuarios y palabra captcha.

Después de darse de alta el usuario procede a agregar parcelas (**Agrega Parcela**), para ello se requiere diferenciarla con un nombre, posteriormente debe seleccionar el cultivo de maíz y la variedad o accesión de un catálogo de 14 posibles, cada una con un modelo fenológico. Se selecciona el año, se captura el mes y día de siembra, para el año se listan solo los que tienen datos de clima, si se desea evaluar alguno que no esté en la base, será necesario agregar los datos a la base de datos previo a calcular los GDD( Figura 39); para la temperatura óptima el sistema propone 30 °C

ya que este valor es comúnmente utilizado en diversos estudios (Gilmore and Rogers, 1958 ; Cross and Zuber, 1972 ; García-Pacheco y López-Castañeda, 2002), sin embargo es posible utilizar otro valor como 27 °C propuesto por Hernández y Carballo(1984) para Valles Altos.

### Datos de la parcela

Usuario:	JAC	← Usuario
Nombre de la parcela:	Parcela de maiz	
Cultivo:	Maiz	
Variedad o Accesion:	Chis337	← Accesiones que cuentan con modelos fenológicos
<b>Fecha de siembra</b>		
Año:	2014	← Años con datos de temperatura y debe coincidir con la fecha de siembra
Mes:	Enero	← Mes y día de la fecha de siembra
Día:		
Superficie(ha):		
Temp. Optima	30	
Enviar registro:	Enviar	

- Chis337
- Chis337
- Hida275
- Hida31
- Mich172
- Mich426
- SLP277
- Vera616
- Vera617
- Vera623
- Vera64
- Yuca158
- Yuca47
- Yuca5
- Yuca91

- 2014
- 2014
- 2015
- 2016

**Figura 39.** Registro de parcela y accesión de maíz.

El catálogo de Estados y Municipios permite realizar un acercamiento para facilitar la localización de la parcela sobre el mapa y así poder colocar la marca y conocer sus coordenadas geográficas y altitud sobre el nivel del mar. En el ejemplo de la Figura 40 se selecciona el Estado de México y posteriormente el municipio de Texcoco y el resultado es un acercamiento a la región de dicho municipio (nota la cercanía y centrado puede variar acorde al tamaño de pantalla de la computadora del usuario).

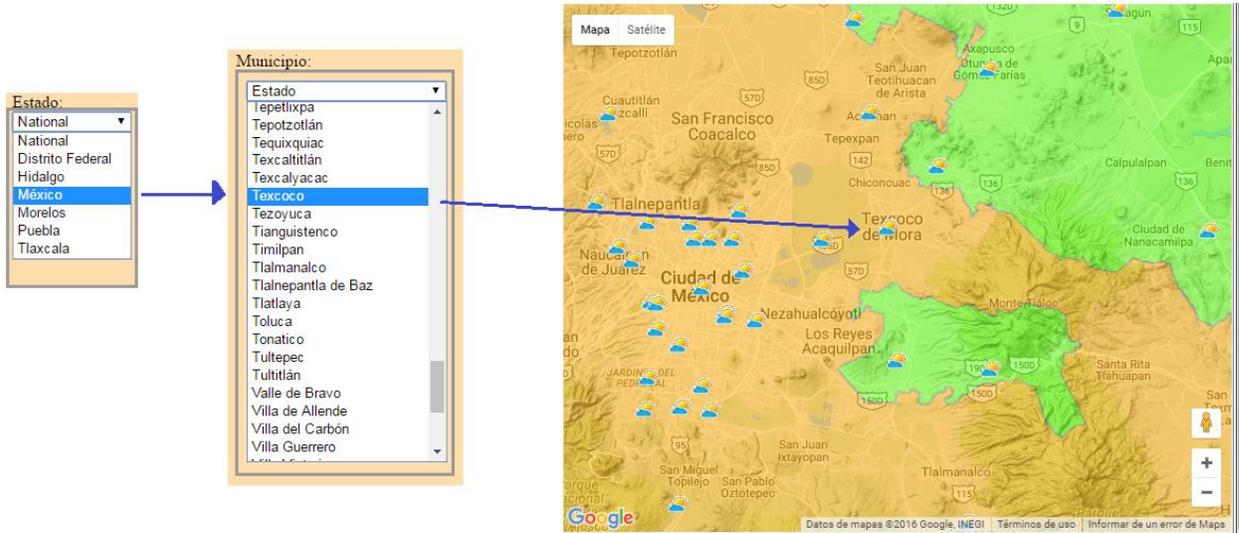


Figura 40. Niveles de acercamiento por Estado y Municipio.

Dado que el sistema requiere las coordenadas geográficas de la parcela para poder calcular distancias, realizar interpolaciones y calcular GDD, es obligatorio capturarlas, sin embargo, si no se conocen es posible realizar un acercamiento a la parcela y dar un clic en el mapa y con ello obtener las coordenadas geográficas, mismas que serán mostradas en las casillas de latitud y longitud del registro de la parcela, así mismo es posible arrastrar la marca  para actualizar las coordenadas. Por otra parte si se desea visualizar las coordenadas sobre el mapa al pasar el puntero se debe activar la siguiente casilla  **Mostrar coordenadas** y para finalizar se pulsa el botón **Actualizar datos de la parcela** para grabar los cambios (Figura 41).

Si no se tiene certeza del lugar y se desea ubicar la parcela más tarde se puede utilizar el botón **Borrar marca** para borrar la marca de la parcela. Para el valor de la elevación se hace uso del servicio de elevación de Google Maps, el cual al dar clic sobre el mapa devuelve la altitud y la coloca en la casilla elevación

Elevación 1652.58

I

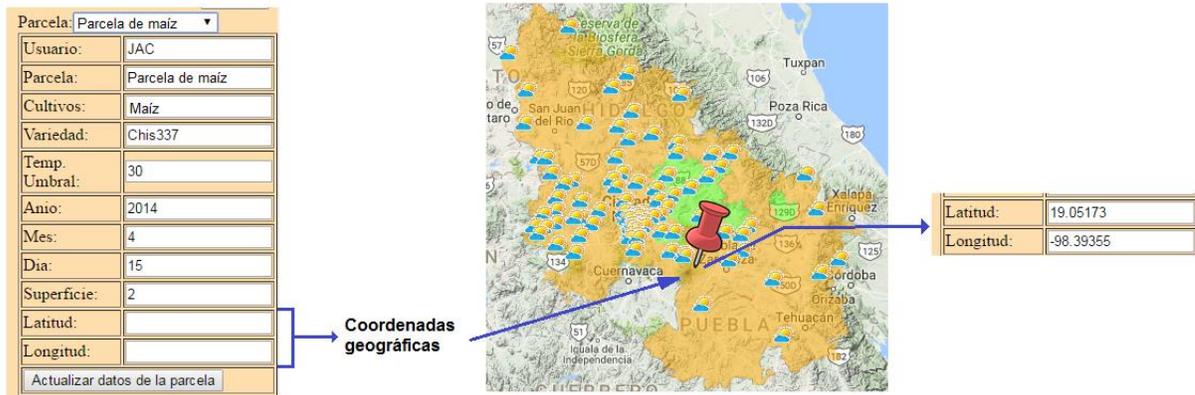


Figura 41. Coordenadas geográficas de la parcela.

Es posible consultar la descripción de la estaciones dando clic sobre el icono  el cual abre una ventana donde muestra el nombre de la estación, el organismo de cuenca de la CONAGUA que la administra, las coordenadas geográficas y altitud sobre el nivel del mar de la estación, así mismo muestra un enlace al sitio del SMN (funcional en la consulta de Junio 2016) donde es posible consultar los datos de clima de dicha estación (Figura 42).



Figura 42. Descripción de la estación EMA.

Para iniciar el proceso de cálculo de los GDD del cultivo de la parcela se utiliza el botón (  ). La primer información que se mostrara en la sección de resultados son los datos de la accesión de maíz seleccionada, seguida de la descripción de las diez primeras estaciones meteorológicas EMA más cercanas a la parcela(Figura 43), posteriormente se mostrara el cálculo de los GDD, día a día hasta completar los requeridos por la Accesión(Figura 44)

**Reporte en formato CSV**

[Archivo csv](#)

Fecha siembra(dd-mm-aa): 23-4-2014  
Accesión: SLP277  
Tb= 7.13162  
GDD= 1526  
Elevacion= 1652.58  
Tumbral 30  
Temp. minima letal 2

---

Estación	Distancia (km)	Elevacion (msnm)
PUEBLA_PUE	35.812	2178
UTTECAMACHALC_PUE	36.103	2025
LA_MALINCHE_II_PUE	43.436	2707
IZUCAR_MATAM_PUE	45.668	1306
LA_MALINCHE_I_TLAX	60.845	2929
TEHUACAN_PUE	66.053	1732
TLAXCALA_TLAX	66.110	2301
HUAMANTLA_TLAX	71.143	2456
IZTA-POPO_MEX	73.966	3691
ALTZOMONI_MEX	76.382	3851

**Datos de la Accesion**

**Estaciones mas cercanas a la parcela**

**Figura 43.** Datos de la accesión y descripción de las principales estaciones EMA.

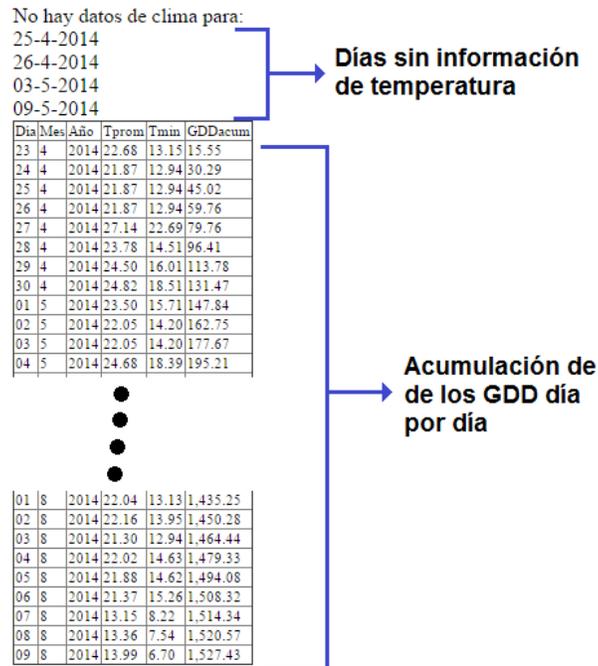


Figura 44. Cálculo de los GDD día a día.

Con la finalidad de identificar el periodo libre de temperaturas mínimas letales para la accesión de maíz, se muestra la sección de temperatura mínimas para el año de siembra, remarcando en rojo los días cuya temperatura es menor o igual a la letal (Figura 45).

**Temperaturas mínimas 2014**

Dia	Mes	Año	Tmin
07	1	2014	20.00
08	1	2014	4.98
09	1	2014	5.97
10	1	2014	7.24
12	1	2014	24.01
13	1	2014	13.09
14	1	2014	12.91
15	1	2014	14.54
16	1	2014	1.79
17	1	2014	5.92
20	1	2014	23.60
21	1	2014	6.51
22	1	2014	3.04
26	1	2014	19.10
27	1	2014	8.66
28	1	2014	25.61
29	1	2014	13.61
⋮			
09	12	2014	7.31
10	12	2014	9.13
11	12	2014	7.82
12	12	2014	10.06
13	12	2014	10.24
14	12	2014	12.72
15	12	2014	8.91
16	12	2014	10.94
17	12	2014	9.35

→ **Día con temperatura mínima letal para el cultivo**

**Figura 45. Días con temperaturas mínimas letales.**

La última sección muestra un resumen de las fechas de los días cuando se tuvo temperatura mínimas letales (si es que las hay) al principio o final del año (Figura 46).

**Numero de dias con Temperatura minima letal: 1**

Fecha	Tmin
16-1-2014	1.79

**Periodo de heladas**

Ultima helada tempranas primer mitad del año	
Fecha	Tmin
16-01-2014	1.79

**Figura 46. Resumen de fechas con temperaturas mínimas letales.**

Los resultados del proceso de cálculo de los GDD) se pueden descargar en formato de texto plano separado por comas en el siguiente link [Archivo.csv](#), dicho formato es compatible con hojas de cálculo como las de EXCEL (Figura 47).

	A	B	C	D	E	F
1	RESUMEN DEL CALCULO DE GDD PARA LA ACCESION: SLP277 DEL USUARIO: JAC					
2	Datos de la parcela					
3	Lote:					Lote 32
4	Fecha de Siembra(dd mm aa):					23/04/2014
5	Accesion:					SLP277
6	Temperatura base(tb):					7.13162
7	Temperatura umbral(tumbral):					30
8	Temperatura minima letal:					2
9	Grados dias desarrollo que requiere la accesion(GDD)					1526
10	Altitud del sitio:					1652.58
11						
12	Las 10 estaciones mas cercanas al sitio:					
13						
14	Estacion			Distancia(km)	Elevacion (msnm)	
15	PUEBLA_PUE			2178	35.812	
16	UTTECAMACHALC_PUE			2025	36.103	
17	LA_MALINCHE_II_PUE			2707	43.436	
18	IZUCAR_MATAM_PUE			1306	45.668	
19	LA_MALINCHE_I_TLAX			2929	60.845	
20	TEHUACAN_PUE			1732	66.053	
21	TLAXCALA_TLAX			2301	66.11	
22	HUAMANTLA_TLAX			2456	71.143	
23	IZTA-POPO_MEX			3691	73.966	
24	ALTZOMONI_MEX			3851	76.382	
25						

Figura 47. Reporte del proceso de cálculo de los GDD en formato CSV.

## A2. DESCRIPCION DE LOS PAQUETES INSTALADORES

En contenido del disco compacto óptico (CD) anexo a esta tesis, se tienen dos carpetas, la primera ( Documento de tesis ) contiene el documento de la presente tesis y la segunda los instaladores ( Instaladores ). A continuación se describe la instalación del SIG.

### A.2.1 Instalación del servidor Web Apache.

El archivo “httpd-2.4.4-win64.zip” contiene los archivos binarios para que funcione el servidor Web Apache, pero no es un instalador, para configurarlo, se crea una carpeta con los archivos binarios y se edita el archivo “httpd.conf”. En la carpeta Apache se tiene un archivo ejemplo de configuración.



### A.2.2. Instalación del interprete PHP.

Para PHP se tiene el archivo instalador  php-5.2.17-nts-Win32-VC6-x86.msi para Windows, el cual creara la carpeta de PHP y lo configura automáticamente, sin embargo, es necesario indicar en el archivo “httpd.conf” la dirección de la carpeta.

### A.2.3. Instalación de MySQL

En la carpeta MySQL se encuentra el archivo  mysql-installer-community-5.7.14.0.msi , el cual lo instala en Windows automáticamente. Durante la instalación se crean usuarios y contraseñas, mismas que son requeridas para configurar el sistema SIG para que se conecte a la base de datos, las credenciales se agregan en el archivo  config.php contenido dentro de la carpeta “includes” del Sistema SIG.

### A.2.4. Instalación del sistema SIG

Una vez que se ha configurado APACHE, PHP y MySQL, solo resta copiar la carpeta  SIG contenida dentro de la carpeta “Código PHP” en el directorio `<Directory "c:/Apache24/htdocs">` descrito en la figura 20 del capítulo 4.5.1.

Para poblar la base de datos del SIG, se tiene el archivo  BaseDeDatos\_SistemaSIG.sql dentro de la carpeta “Base de Datos”, se puede utilizar la siguiente instrucción ejemplo en la línea de comandos de MySQL.

```
mysql -u Usuario -p contraseña "C:\MySQLScript.sql"
```

Por último, si se desea procesar información nueva en formato texto proveniente de las estaciones EMA del SMN, se puede editar y utilizar el código del archivo:

 LectorArchivosEma.php