



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

TESIS

“DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA RECARGA VERTICAL
POTENCIAL DE ACUÍFEROS APLICANDO UNA HERRAMIENTA GIS”



Que para obtener el título de:

Ingeniero Geólogo

Presenta:

Víctor Andrés Lojero Ochoa

Director:

ING. Antonio Hernández Espriú

México, D.F. Junio 2010

A mis padres que lo hicieron todo por mí, menos...

Escribir esta tesis.

La temperatura baja, el viento sopla más fuerte
una gota golpea mi rostro anunciando la tormenta que se avecina.
Busco un lugar cubierto, algún refugio donde ponerme a salvo, donde entrar en calor.
Y mire adonde mire sólo hay un campo infinito, verde, vacío y un cielo amenazante sobre mí.
Estoy solo ante el mundo y empieza a llover..

Y es entonces cuando, derrotado por la inminencia del presente,
bajo mis brazos, levanto mi rostro y me sumerjo en esa alfombra de contundente verdor..
De repente, una victoria, un milagro, la explosión de la vida alrededor de mí.
Una ráfaga de luz que me recuerda que en realidad no estoy solo y nunca lo estaré.

Gracias a:

Mi familia, mi hermana Sara, tíos, tías, primos y demás... fueron, son y serán mi incondicional apoyo y motivación.

Mis maestros Toño, Elizabeth, Luis, Fernando, Rubén y un especial agradecimiento al Técnico Jorge René Alcalá Martínez encargado del laboratorio de física de suelos de la UNAM. Y a todos aquellos que con su enorme paciencia y conocimientos hicieron de mí un ingeniero.

Adrián, Obed, Jenny, Emilio, Oscar, Dana, Manuel, Cascabel, Caro gracias por compartir a mi lado, este trecho del camino.

Y a todas esas lindas y virtuosas mujeres que quise, quiero y querré...



Índice general

1. INTRODUCCIÓN	7
1.2. Antecedentes	7
1.3. Justificación	8
1.4. Objetivo	10
1.5. Marco teórico	10
1.6. Definiciones y conceptos	11
2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS (SIG)	13
2.1. Sistemas de Coordenadas Geográficos (SCG)	14
2.2. Sistemas de coordenadas proyectados	14
2.3. Beneficios que aportan los SIG	15
2.4. Modelo de datos	15
2.5. Aplicaciones de los SIG en la hidrología	17
2.6. Limitaciones de los SIG en la modelación hidrológica	18
3. METODOLOGÍA	20
3.1. Recopilación bibliográfica	20
3.2. Modelo conceptual	21
3.3. Delimitación de las cuencas	22
3.4. Selección de las estaciones climatológicas	24
3.5. Cálculo de la lámina de precipitación anual	27
3.6. Cálculo de la evapotranspiración anual	30
3.7. Base de datos	31
3.8. Interpolación espacial por el método de kriging	31
3.9. Cálculo del escurrimiento	33
3.9.1. Análisis edáfico	34
3.9.1.1. Trabajo de campo	35
3.9.1.2. Trabajo de laboratorio	37
3.9.2. Cálculo del parámetro K	37
3.9.3. Mapas de coeficiente de isoescorrentamiento (Ce)	38
3.9.4. Mapas de isoescorrentamiento	38

3.10. Mapas de RVP	38
4. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO NATURAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	39
4.1. Localización del área de estudio.....	39
4.2. Geología.....	41
4.2. Edafología y vegetación.....	43
4.3. Climatología	47
4.4. Hidrología Superficial.....	52
4.5. Hidrología Subterránea	48
5. RESULTADOS	56
5.1. Variación espacio-temporal de la precipitación	56
5.2. Variación espacio-temporal de la evapotranspiración	56
5.3. Análisis edáfico	56
5.3.1. Trabajo de Campo	56
5.3.2. Trabajo de laboratorio	57
5.4. Clasificación de los suelos según la NOM-011	52
5.5. Cálculo del parámetro K	60
5.6. Mapas de coeficiente de isoescorrentamiento y lámina de escorrentamiento	60
5.7. Variación espacio temporal de la RVP	60
6. DISCUSIÓN	67
6.1. Variación espacio-temporal de la precipitación	67
6.2. Variación espacio-temporal de la evapotranspiración	69
6.3. Variación espacio-temporal del escorrentamiento	71
6.4. Variación espacio-temporal de la recarga vertical potencial (RVP)	72
6.5. Limitantes el método propuesto	75
6.6. Líneas futuras de investigación	76
7. CONCLUSIONES	79
REFERENCIAS CITADAS	81
ANEXOS	85
Anexo 1. Formatos de campo para los PVE	85
Anexo 2. Resultados de laboratorio	90
Anexo 3. Lista de Acrónimos	94

Índice de Figuras

Figura 1.1. Ciclo hidrológico en México	8
Figura 2.1. Componentes de un SIG	13
Figura 2.2. Representación de los modelos de datos espaciales: vector y raster	16
Figura 3.1. Desarrollo metodológico de este trabajo	21
Figura 3.2. Imagen ensamblada a partir de los MDE	23
Figura 3.3. Cuencas delimitadas a partir de los MDE	23
Figura 3.4. Ubicación de las estaciones climatológicas	26
Figura 3.5. Número de estaciones climatológicas con porcentaje de fidelidad $\geq 75\%$	27
Figura 3.6. Puntos de verificación edafológicos	35
Figura 3.7. Muestras saturadas mediante capilaridad.....	46
Figura 3.8. Olla de presión para el drenado de suelos	41
Figura 4.1. Localización del área de estudio	39
Figura 4.2. Ubicación del sector occidental (Occ) de la FVTM	42
Figura 4.3. Geología de la zona de estudio	43
Figura 4.4. Rasgos morfológicos del área de estudio	44
Figura 4.5. Mapa edafológico del área de estudio	45
Figura 4.6. Climatograma promedio de las estaciones seleccionadas procesado del año 1980 a 1989	48
Figura 4.7. Subregiones hidrológicas en Jalisco	49
Figura 4.8. Regiones hidrológicas del estado de Jalisco	50
Figura 4.9. Hidrografía de la zona de estudio	51
Figura 4.10. Secciones del acuífero Ameca	55
Figura 5.1. Mapas de isoyetas	58
Figura 5.2. Mapas de isoevapotranspiración	59
Figura 5.3. Tipos de suelos según la NOM-011	60
Figura 5.4. Uso de suelos	61
Figura 5.5. Mapa de distribución del parámetro K	61
Figura 5.6. Mapas de coeficiente de isoescorrimento	63
Figura 5.7. Mapas de lámina de escurrimento.....	64

Figura 5.8. Mapas de lámina de RVP	65
Figura 5.9. Mapas de coeficiente de RVP	66
Figura 6.1. Lámina de precipitación promedio de todas las microcuencas para la serie de años seleccionada.....	67
Figura 6.2. Localización del acuífero de Ameca	68
Figura 6.3. Localización de las cuencas de Toluquilla y Atemajac	69
Figura 6.4 Lámina de evapotranspiración promedio de todas las cuencas para la serie de años seleccionada.....	70
Figura 6.5. Lámina de escurrimiento promedio de todas las cuencas para la serie de años seleccionada	71
Figura 6.6. Lámina de RVP promedio de todas las cuencas para la serie de años seleccionada	72
Figura 6.7. Comparación del comportamiento de las líneas de isocoficiente de RVP con respecto a las isoyetas para el año de 1986	73
Figura 6.8. Localización de las unidades hidrológicas comparadas	74
Figura 7.1 Valores porcentuales de evapotranspiración, escurrimiento e infiltración o RVP promedios para todas las cuencas durante la serie de años analizada	79
Figura 7.2. Gráfica comparativa de los parámetros hidrometeorológicos durante la serie de años seleccionada	80
Figura A.1 Perfil en el PVE-1	85
Figura A.2. Perfil en el PVE-2	86
Figura A.3. Perfil en el PVE-3	87
Figura A.4. Perfil en el PVE-4	88
Figura A.5. Perfil en el PVE-5	89
Figura A.6. Curva de retención de humedad para el PVE-1A	90
Figura A.7. Curva de retención de humedad para el PVE-1B	90
Figura A.8. Curva de retención de humedad para el PVE-2A	91
Figura A.9. Curva de retención de humedad para el PVE-2B	91
Figura A.10. Curva de retención de humedad para el PVE-3	92
Figura A.11. Curva de retención de humedad para el PVE-4A	92
Figura A.12. Curva de retención de humedad para el PVE-4B	93
Figura A.13. Curva de retención de humedad para el PVE-5	93



Índice de Tablas

Tabla 1.1. Usos del agua en México	9
Tabla 3.1. Claves de los MDE utilizados	22
Tabla 3.2. Localización de las estaciones climatológicas en el área de estudio	25
Tabla 3.3. Base de datos de la lámina de precipitación mensual para la estación climatológica 14301 durante los años 1980-1989	28
Tabla 3.4. Base de datos de la temperatura media mensual para la estación climatológica 14301 durante los años 1980-1989	19
Tabla 3.5. Base de datos generada para el año de 1982	32
Tabla 3.6. Clasificación del tipo de suelo según la NOM-011-CNA-2002	33
Tabla 3.7. Valores de k según la NOM-011	34
Tabla 4.1. Coordenadas extremas del área de estudio	39
Tabla 4.2. Características de los principales municipios de la zona de estudio	40
Tabla 4.3. Características de las microcuencas del área de estudio	52
Tabla 4.2. Disponibilidad de Aguas Subterráneas por Acuífero, en Mm ³ /año	53
Tabla 5.1. Resultados promedios para cada horizonte de los suelos analizados en laboratorio	57
Tabla 5.2. Parámetro K ponderado	62
Tabla 6.1 Comparación de la RVP del área de estudio con respecto a unidades hidrológicas vecinas	74
Tabla A.1. Densidad real, densidad aparente y porosidad	94

1. INTRODUCCIÓN

El bienestar de las sociedades y en general de cualquier especie viva depende directamente del agua, tanto de su calidad como de su ocurrencia. Por esta razón para la humanidad ha sido vital el desarrollo de técnicas que permitan cuantificar la cantidad de agua con la que se dispone para usos hídricos sanitarios, de agricultura, producción de bienes y otros, así como su distribución dentro de una región. Los balances hidrometeorológicos resultan una herramienta útil para la gestión adecuada de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, ya que nos permite estimar la cantidad de agua que potencialmente pudiera llegar a los acuíferos por recargas verticales de lluvia, lo que se le denomina Recarga Vertical Potencia (RVP).

1.2. Antecedentes

Al igual que en todas las ciencias, en la hidrología es difícil establecer un límite en el cual el conocimiento intuitivo y empírico se transformó en conocimiento reflexivo y predictivo, es decir en qué momento exacto de la historia nace una ciencia y tal vez más difícil aún, es establecer el momento en que ese conocimiento es aplicado para beneficio de la sociedad en la solución de problemas reales, cuando se vuelve una ingeniería.

En sus orígenes, los albores de la ciencia hidrogeológica y los primeros balances hidrológicos hay que situarlos a finales del siglo XVII, asociados a las ideas y demostraciones cuantitativas de los franceses Pierre Perrault (1608-1680) y Edmé Mariotte (1620-1684), entre otros.

Perrault fue cobrador general de finanzas de la generalía de Paris. Sus teorías acerca de las aguas subterráneas y del ciclo hidrológico aparecen recogidas en su obra “De l’origine des Fontaines”, publicada en 1674. Perrault recopiló los datos pluviométricos de tres años consecutivos de la cuenca alta del Sena (en Borgoña) y, simultáneamente, realizó aforos periódicos en el río. Al final de este periodo, al calcular y comparar los valores de las aportaciones totales del río con los de las lluvias, encontró que estas habían sido seis veces superiores a los aforos, con lo que quedaba derrocada la antigua teoría de que el agua de las lluvias era cuantitativamente insuficiente para justificar las aportaciones de los ríos (Gill, 1972).

Mariotte, contemporáneo de Perrault, repitió y confirmó el experimento de este último en un punto diferente de la cuenca del Sena, concretamente en el Pont Royal de Paris. Demostró, además, la existencia real de la infiltración profunda del agua de lluvia a través del terreno mediante una serie de experimentos. Demostró, en efecto, que el caudal de los numerosísimos manantiales que había estudiado oscilaba de acuerdo con las precipitaciones y con la extensión de su cuenca de recepción (Gill, 1972).

En épocas recientes el incremento en la demanda de los recursos hídricos ha propiciado el desarrollo de esta ciencia relativamente nueva. Técnicas de perforación modernas que permiten hacer pozos a profundidades nunca antes imaginadas, métodos geofísicos con los cuales es posible apreciar propiedades físicas del subsuelo y hacer correlaciones

hidrogeológicas, métodos geoestadísticos con los que es posible obtener una aproximación estocástica para cuantificar la variabilidad climática, además del desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son algunas de las poderosas y nuevas herramientas que los hidrogeólogos de la actualidad pueden utilizar con el fin de realizar gestiones adecuadas de los recursos hídricos disponibles y de esta manera impulsar el desarrollo socio-económico de una región.

En la actualidad los SIG y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses. Por esa razón, cada vez más investigadores se ayudan de los SIG para la construcción de modelos hidrológicos (Morad et al, 2001). Los SIG se componen de una base de datos espacialmente referenciada y de un conjunto de instrucciones y procedimientos que permiten operar sobre ella (Burrough, 1998). Hasta llegar a la situación actual estos sistemas han experimentado una evolución que se asienta sobre tres pilares. El primero de ellos es la cartografía, segundo los procedimientos técnicos para el análisis de mapas y tercero, la identificación, representación y manipulación de datos geográficos la cual obedece a una necesidad ancestral de la humanidad. Mucho antes de que los ordenadores comenzaran a emplearse los cartógrafos ya habían ideado sofisticadas nociones para el análisis espacial y la representación de información geográfica (Jones, 1997). En su legado encontramos métodos para implementar funciones espaciales tales como la superposición, intersección y cálculos de proximidad. Obviamente, el proceso de informatización posterior ha contribuido de manera notable a facilitar la ejecución de este tipo de operaciones (Burrough, 1998).

1.3. Justificación

Anualmente México recibe del orden de $1.51 \times 10^{12} \text{ m}^3$ de agua en forma de precipitación. De esta agua, el 72.5% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 25.6% escurre por los ríos o arroyos y el 1.9% restante se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos, de tal forma que anualmente el país cuenta con $0.465 \times 10^{12} \text{ m}^3$ de agua dulce renovable, denominada disponibilidad natural media. En la figura 1.1 se muestran los componentes y valores de dicha disponibilidad (Comisión Nacional del Agua, 2008).

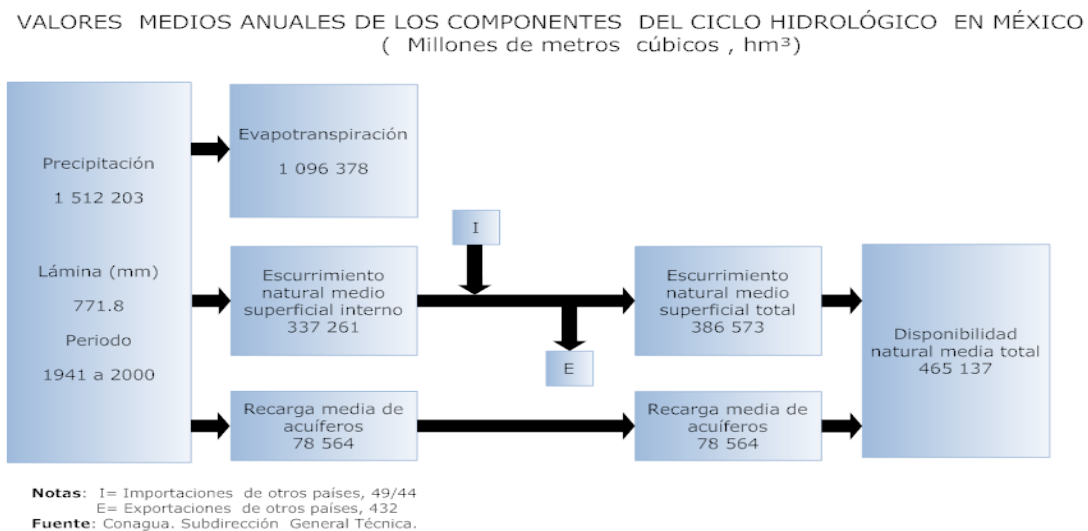


Figura 1.1. Ciclo hidrológico en México. Elaborado a partir de datos de la Comisión Nacional del Agua 2008.

Además del agua dulce que se renueva en forma de lluvia, la cual se distribuye en las 718 cuencas hidrográficas en las que está dividido el país, agrupadas a su vez en 37 regiones hidrológicas, y que al mismo tiempo están congregadas en 13 regiones hidrológico-administrativas, México tiene gran parte de sus reservas de agua almacenadas en 653 acuíferos o unidades hidrogeológicas (cerca del 37% aproximadamente 28.341 Mm³/año del volumen total concesionado para usos consuntivos es de origen subterráneo), conforme a lo publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001; sin embargo, esta agua no se considera en los cálculos de disponibilidad natural media, ya que no es del todo renovable.

El principal uso del agua en México es agrícola, el 76.8% del volumen concesionado para uso consuntivos se destina a este rubro, esta agua se refiere al agua utilizada para el riego de cultivos, distribuida en los distritos de riego y las unidades de riego con que cuenta el país. La superficie territorial dedicada a las labores agrícolas en México es aproximadamente entre los 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año. El valor de la producción agrícola directa equivale al 6.5% del PIB nacional. Además, entre 4 y 5 millones de personas se dedican a la agricultura y se estima que dependen directamente de la actividad entre 20 y 25 millones de mexicanos, en su mayoría población rural (Comisión Nacional del Agua, 2008).

Es de destacar que, la superficie de riego del país ha aumentado considerablemente de 750 mil hectáreas en 1926 a 6.4 millones de hectáreas actualmente, lo que coloca al país en el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego. El 54% de la superficie bajo riego corresponde a 85 Distritos de Riego y el 46% restante a más de 39 mil Unidades de Riego (Comisión Nacional del Agua, 2008).

En la tabla 1.1 se pueden comparar los usos consuntivos según origen de fuente de extracción, incluye los rubros agrícola, los rubros público urbano y doméstico, también las cantidades usadas para los rubros industrial, agroindustrial, servicios y comercio de la clasificación del REPDA (Registro Público de Derechos de Agua).

Tabla 1.1. Usos del agua en México. Fuente: Comisión Nacional del Agua 2008.

Uso	Origen		Volumen total (Mm ³)	Extracción %
	Superficie	Subterráneo		
Agrícola	39.72	19.67	59.40	76.82
Abastecimiento público	3.90	6.83	10.74	13.89
Industria autoabastecida	1.60	1.36	2.97	3.84
Termoeléctricas	3.75	0.45	4.20	5.44
Total Nacional	48.98	28.34	77.32	100

La zona de estudio se localiza en el estado de Jalisco el cual consume anualmente un total de 3.55 Mm³ de agua, de los cuales un 76.4% es utilizado con fines agrícolas de este volumen de agua aproximadamente 1.02 Mm³ es extraído de los acuíferos (Comisión Nacional del Agua, 2008). Dentro de las cuencas en estudio se localizan municipios de Ameca, Ahualulco de Mercado, Cocula, San Martín Hidalgo y Tala, donde el principal medio de producción es el cultivo de agaves mismos que son utilizados para la fabricación del tequila, bebida mexicana única en denominación de origen y con un gran sentido cultural para el pueblo mexicano que por su amplia demanda dentro y fuera del país, obliga a los fabricantes a mantener una producción constante durante todo el año que a su vez se traduce en un volumen de agua que será utilizados y que provienen no solo de fuentes superficiales, también de la explotación de los mantos freáticos (se estima que se requieren al menos 10 litros de agua para producir un litro de tequila).

Con todo lo anterior, queda claro que México es un país de agua, de ella depende y de ella vive, también queda claro que el agua subterránea está cobrando cada vez más importancia como un recurso aprovechable y vital para el desarrollo sustentable del país, por tal razón se vuelve necesario desarrollar nuevas técnicas y metodologías sustentadas en el conocimiento científico así como en la aplicación de herramientas modernas que permitan realizar gestiones adecuadas a los recursos hídricos. En este sentido los SIG embonan perfectamente en las necesidades actuales de modelación hídrica por lo que cada vez son más utilizados entre los hidrólogos del mundo.

1.4. Objetivo

Proponer una metodología sencilla, práctica y reproducible que permita estimar las variaciones espacio-temporales de la Recarga Vertical Potencial (RVP) de acuíferos, utilizando Sistemas de Información Geográficos (SIG).

1.5. Marco teórico

El agua que se presenta en una cuenca o región hidrográfica puede dividirse en dos grandes ramas, aguas superficiales y aguas subterráneas. Sin embargo y a pesar de la aparente separación entre ambas ramas de la hidrología, estos dos tipos de flujos se encuentran íntimamente relacionados entre sí, mediante uno de los términos de la ecuación de balance hídrico de una cuenca. Este término es la infiltración o recarga vertical potencial (RVP).

Infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno en el suelo; se distingue del proceso de percolación porque este último es el movimiento de agua desde o a través de la zona no saturada hasta el nivel freático o zona saturada (Sáenz, 1999).

La RVP es una medida de la cantidad de agua que logra penetrar en la pedósfera y tiene como fuente principal la precipitación que cae dentro de una cuenca. Es posible estimar la RVP en una cuenca mediante una ecuación de balance de materia generalizada (Voudouris K, 2007).

$$P = ETR + E + RVP + dw + dq \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1}$$

Donde:

P =precipitación.

ETR =evapotranspiración real.

E =escurrimiento.

RVP =recarga vertical potencial.

dw =la variación de la cantidad de las reservas de agua.

dq =intervención humana.

Si consideramos dw y dq como despreciables y despejamos RVP la ecuación resultante es:

$$RVP = P - ETR - E \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.2}$$

Pero el cálculo de esta cantidad de agua no es tan sencillo como parece, ya que depende de muchos factores que varían espacialmente dentro de una cuenca como: la topografía, la geología, la edafología y la vegetación entre otros. Además de factores climáticos que varían temporalmente como: la precipitación y la temperatura atmosférica, misma que influye directamente en evaporación y transpiración dentro de la cuenca o región hidrográfica.

1.6. Definiciones y conceptos

Con el fin de proporcionar una base teórica que homogenice el conocimiento que se trata de transmitir mediante este trabajo, a continuación se presentan una serie de definiciones mismas que de ahora en adelante conceptualizarán las ideas más generales.

Sistema de Información Geográfico (SIG): Un sistema de información geográfico es un sistema para la gestión, análisis y visualización de conocimiento geográfico que se estructura en diferentes conjuntos de información (ESRI, 2010).

Cuenca hidrográfica: es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado (cuenca exorreica), o no (cuenca endorreica) a través de una salida simple (Sáenz, 1999).

Meteorología: es la ciencia que estudia los fenómenos que se producen en la atmósfera (Gracia, 2002).

Precipitación: la precipitación es, en general, el término que se refiere a todas las formas de la humedad emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre, tales como la lluvia, granizo, neblina, nieve o helada (Sáenz, 1999).

Evapotranspiración: se define como el volumen de agua que desde el estado sólido o líquido pasa a la atmósfera a estado de vapor, bien por evaporación directa o bien por transpiración de las plantas. Habitualmente se expresa en mm para un tiempo determinado. Thornthwaite distingue entre evapotranspiración potencial (ETP) y evapotranspiración real (ETR) (Martínez Pedro E., 2006).

Evapotranspiración potencial: es el volumen de agua que pasaría a la atmósfera en forma de vapor como consecuencia de la evaporación directa y de la transpiración de las plantas en el supuesto caso de que siempre hubiese la cantidad de agua necesaria disponible para tales efectos. No depende por lo tanto del valor de precipitación ni de la

cantidad de agua contenida en el suelo a disposición de las plantas (Martínez Pedro E., 2006).

Evapotranspiración real: es el volumen de agua que pasará a la atmósfera en forma de vapor como consecuencia de la evaporación directa y de la transpiración de las plantas en función del volumen de agua disponible. De su definición se desprende que la ETP será siempre mayor o igual a la ETR (Martínez Pedro E., 2006).

Escurrimiento o escorrentía: comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno o la escorrentía de una corriente de agua, que puede ser alimentada tanto por el exceso de precipitación como por las aguas subterráneas (Sáenz, 1999)

Infiltración o RVP: es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno en el suelo; se distingue del proceso de percolación porque este último es el movimiento de agua desde o a través de la zona no saturada hasta el nivel freático o zona saturada (Sáenz, 1999).

Suelo: es el continuo de espacio-tiempo que forma la parte superior de la corteza terrestre, siendo el producto de las alteraciones de rocas y materiales, mediante los procesos pedogenéticos que operan a través del tiempo sobre el material parental y el propio suelo (Gama-Castro et al. 1999).

2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS (SIG)

La geografía tradicionalmente ha provisto de un marco y lenguaje claro para organizar y transmitir conceptos claves acerca del mundo que nos rodea, visto desde esa perspectiva, un SIG es un sistema para el manejo, análisis y visualización de conocimientos geográficos, que está representada por una serie de información establecida.

Los SIG, han sido definidos de diversas maneras en el transcurso de su evolución dependiendo de la aplicación que le hayan dado los usuarios. Desde un punto de vista global un SIG puede ser considerado un conjunto organizado de *hardware*, *software*, datos y técnicas eficientemente diseñadas para la captura, almacenamiento, actualización, manipulación, visualización y análisis de información geográficamente referenciada (GRID/UNEP, 1993). Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación los define como sistemas computarizados para el almacenamiento, elaboración y recuperación de información con equipo y programas informáticos expresamente concebidos para trabajar con datos georeferenciados y sus correspondientes atributos temáticos (FAO, 1988).

La descripción realizada hasta el momento se ajusta a los intereses de los especialistas en recursos naturales, difiriendo sustancialmente de las aportadas por los científicos especializados en recursos hídricos (Johnson, 1988). Para estos últimos los SIG son equipos y programas informáticos destinados al desarrollo, procesamiento, almacenamiento y recuperación de datos espacialmente distribuidos. En esta concepción los SIG actúan como gestores de gráficos, flexibles, interactivos y muy competentes para la modelación espacial (Morad et. al, 2001). La figura 2.1 muestra los componentes que conforman un SIG.



Figura 2.1. Componentes de un SIG.

2.1. Sistemas de Coordenadas Geográficos (SCG)

Dentro de un SIG, una colección homogénea de datos geográficos es organizada en una serie de capas temáticas que cubren una determinada región geográfica por ejemplo caminos, ríos, ciudades, tipos de suelos, geología y otras características localizables.

Muchas de las relaciones espaciales entre capas, pueden ser fácilmente inferidas a través de una localización geográfica común. Describir la correcta localización y características de una capa requiere de un marco de trabajo en el cual se pueda definir el mundo real. Por tal razón un sistema de coordenadas geográfico (SCG) homogéneo entre las capas es de suma importancia para determinar la correcta ubicación entre los objetos que se deseen representar.

Un SCG es un sistema que utiliza latitud y longitud para localizar un punto en la superficie de la tierra, comúnmente un SCG es confundido con la definición de datum, pero un datum es solo una parte de un SCG el cual se conforma además de una medida angular y un meridiano principal.

Un datum define la posición de un esferoide con respecto al centro de la tierra que represente de la mejor manera las características geométricas de la tierra. Un datum ofrece un marco de referencia para la medición de los lugares en la superficie de la tierra, define el origen y la orientación de las líneas de latitud y longitud.

Como ya se mencionó anteriormente, un SCG ubica un punto en la Tierra según sus valores de longitud y latitud los cuales son ángulos medidos desde el centro de la tierra hasta la superficie de la misma. En un sistema esférico las líneas que van de este a oeste son llamadas líneas de latitud o paralelos, la línea de latitud media entre los polos es llamada ecuador y es definida como la línea de latitud cero, comúnmente es medida en grados, minutos y segundos y se considera positiva con valores de 0° a 90° hacia el polo norte y viceversa. Por otro lado las líneas que van de norte a sur son llamadas líneas de longitud o meridianos, la línea de longitud cero es definida como el meridiano primario y en la mayoría de los SCG se considera al meridiano que pasa por Greenwich, Inglaterra como el meridiano principal. Los valores en los meridianos se toman en cuenta con respecto al meridiano principal, tomando valores de 0° a 180° hacia el este y viceversa.

Por los motivos anteriores se debe entender que si se cambia el datum, se estará cambiando también el valor de las coordenadas de los objetos que se deseen representar en un conjunto de capas georeferenciadas. El datum utilizado para la georeferenciación de los mapas en este trabajo es el WGS84 (siglas en inglés de World Geodetic System 1984). Por ser junto con el ITRF92 (International Terrestrial Reference 1992) el datum más conveniente para representar las características geográficas de la república mexicana, solo que este último datum es únicamente utilizado en México lo cual lo vuelve inconveniente para el intercambio de información con otros usuarios de SIG.

2.2. Sistemas de coordenadas proyectados

Un sistema de coordenadas proyectado es definido en un plano, donde cada punto es representado como un par ordenado (x,y) dentro de una cuadrícula. Estos dos valores son llamados coordenada en “x” y coordenada en “y” respectivamente donde los valores $(0,0)$ corresponden al centro de la cuadrícula, a diferencia de un SCG, un sistema

de coordenadas proyectado contiene ángulos y áreas iguales a lo largo de todo el plano. Un sistema de coordenadas proyectado está basado en un sistema de coordenadas geográfico, que a su vez se encuentra basado en una esfera o esferoide.

Debido a que la superficie de la Tierra se idealiza como una esfera o un esferoide, es necesario realizar transformaciones matemáticas conocidas como proyecciones para poder representar en un plano las características tridimensionales de la superficie terrestre. Sin embargo siempre que se realice algún tipo de proyección se debe estar consciente que se está alterando alguna de las características de la superficie, por tal razón se han desarrollado diferentes tipos de proyecciones para diferentes propósitos.

- **Proyecciones conformes:** Estas proyecciones conservan la forma de los objetos, para ello debe preservar los ángulos individuales de tal forma que se conserven las relaciones espaciales entre los objetos y sus formas.
- **Proyecciones de áreas iguales:** éste tipo de proyección conserva las áreas de los objetos mostrados, sin embargo las otras propiedades como la forma y los ángulos se ven distorsionadas. En las proyecciones de áreas iguales los meridianos y los paralelos pueden no interceptarse en ángulos rectos.
- **Proyecciones equidistantes:** en estas proyecciones se conservan distancias entre puntos, sin embargo la escala no se conserva en todo el mapa. Sin embargo pueden existir una o más líneas a lo largo del mapa donde la escala se conserva.

2.3. Beneficios que aportan los SIG

- Los SIG posibilitan la integración de fuentes diversas, tales como elementos cartográficos, datos estadísticos, planillas de cálculo, bases de datos, fotos aéreas e imágenes satelitales.
- Por otra parte, los mapas digitales en base SIG, no presentan la dificultad de manipular información en diferentes escalas. Sin embargo, a pesar de manejar información a diferentes escalas la resolución de la información no se mantiene, ya que el nivel de detalle entre mapas digitalizados a diferentes escalas es diferente.
 - La información existente puede asociarse para generar nueva información.
 - Al contrario de los mapas tradicionales, los mapas SIG cambian dinámicamente en la medida que los datos alfanuméricos son actualizados.
 - La mayoría de los SIG vienen programados con herramientas de medición, cálculo, métodos de interpolación, exploración espacial y otras que facilitan el análisis de información geográfica.

2.4. Modelo de datos

La correcta implementación de un SIG debe considerar todos y cada uno de sus elementos fundamentales, entendiéndose como tales el *software*, *hardware*, los datos y el personal calificado (Maguire, 1991). Además, la representación digital del mundo real supone conceptualizar el espacio, lo cual se realiza a través de los modelos de datos (Morad, y otros, 2001).

El modelo de datos en un SIG puede ser raster o vectorial (figura 2.2). Las bases de datos de tipo raster están compuestas por una retícula regular en la que cada celda tiene asignado un valor discreto a modo de atributo (Chrisman, 1997). En el modelo vectorial las *entidades*¹ se definen por pares de coordenadas que configuran puntos, líneas o límites de polígonos para regiones con un mismo valor temático (Jones, 1997). Por supuesto cada modelo presenta sus propias ventajas e inconvenientes. Las bases de datos raster se caracterizan por ser muy simples y los cálculos sobre ellas bastante sencillos; sin embargo las vectoriales poseen compleja estructuras que requieren sofisticados algoritmos para el análisis (Burrough, 1998). No obstante, los datos vectoriales pueden ser almacenados compactamente y visualizados con gran precisión, a diferencia de lo que ocurre en el formato raster. Asimismo, estas representaciones muestran el característico efecto *aliasing*² como consecuencia de la forma rectangular de las celdas que componen la retícula.

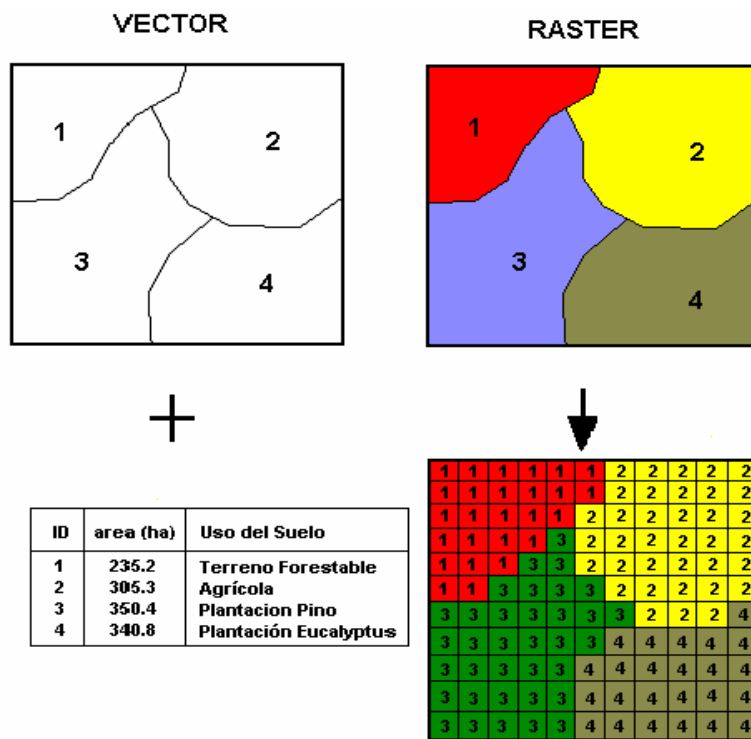


Figura 2.2. Representación de los modelos de datos espaciales: vector y raster.

¹ Para la Spatial Data Transfer Standard (SDTS) de los Estados Unidos de América las entidades son cosas en el mundo real, mientras que los objetos se corresponden con la representación de las entidades en el mundo digital (Mark, 1999). Terminología muy difundida y ampliamente aceptada en el campo de los SIG

² Efecto escalera que se produce en las imágenes digitales.

2.5. Aplicaciones de los SIG en la hidrología

Maidment (1993) ha agrupado las aplicaciones de los SIG en la hidrología de la siguiente manera:

- Evaluación e inventarios hidrológicos.
- Determinación de parámetros hidrológicos.
- Construcción de modelos hidrológicos sencillos (sin análisis estadístico).
- Construcción de modelos hidrológicos integrados.

La mayor parte de las aplicaciones hidrológicas llevadas a cabo en los SIG son evaluaciones de riesgos naturales y estudios de localización. Ambas tienen muchos aspectos en común e incluso poseen un cierto parecido, aunque disponen de un tratamiento diferente. En los estudios de localización de actividades las condiciones para la implantación son conocidas a priori. En estos casos la aplicación de operadores booleanos a datos de distinta naturaleza se ha mostrado muy eficaz para sondear con rapidez las áreas más apropiadas y desfavorables para la instalación de una determinada actividad. Por su parte, en las evaluaciones de riesgos naturales se ejecutan operadores aritméticos algo más complejos con el propósito de generar índices sobre la totalidad o una sección de la cuenca hidrográfica. Estos índices generalmente dan como resultado una representación aritmética y ponderada de los atributos más relevantes para el estudio. Ejemplos interesantes son el índice para la valoración de la vulnerabilidad acuífera DRASTIC (Halliday, y otros, 1990) y los modelos aplicados a la capacidad de carga de un territorio (Johnston, 1987).

En las modelaciones hidrológicas debemos diferenciar con claridad lo que es el conjunto de procedimientos y recursos utilizados en el proceso de modelización, de la manera en que estos se implementan en los SIG. La mayor parte de los investigadores utilizan esta herramienta para generar parámetros que den un sentido lógico a la modelización. Para ello se emplean procedimientos de cálculo ya existentes que normalmente han sido ideadas fuera del campo de los SIG, convirtiéndolos en una mera herramienta para la gestión de información geográfica.

Por ejemplo, Wolfe y Neale (1988) han descrito la aplicación de un SIG para el desarrollo de un modelo hidrológico espacialmente distribuido y parametrizado (*Finite Element Storm Hydrograph Model*, FESHM). En este caso particular el modelo se compone de dos partes que precisan niveles de discretización diferentes. La primera de ellas observa la aparición de escorrentía en el área de estudio. Su cálculo es realizado para cada una de las superficies identificadas como unidades de respuesta hidrológica (*Hydrological Response Units*, HRU). Las HRU sencillamente son áreas con un mismo comportamiento y capacidad de respuesta ante las precipitaciones. Esta primera discretización se consigue integrando, gracias a la función de superposición de polígonos de los SIG, los usos del suelo con la clasificación edafológica. La otra parte del FESHM analiza la dirección, sentido y cantidad de escorrentía, para lo cual la zona de estudio también se debe discretizar mediante la identificación de subcuencas de drenaje. Esto último desarrollando un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en el SIG.

Relacionado con el modelo anterior White (1988) ha utilizado los SIG para combinar el grado de permeabilidad del suelo con las cantidades de precipitación recogidas, hallando la distribución de los valores de escorrentía. Por su

parte Steube y Johnston (1990) los han empleado para delimitar cuencas y estimar la cantidad total de agua que podría drenar un área concreta. De este modo se completa de principio a fin dentro de un entorno SIG un método para hallar la relación matemática existente entre precipitación y escorrentía. Posteriormente S. Choudhry (1997a) ya utilizó el conocido ArcInfo para construir modelos de escorrentía. Estos estudios y sus aplicaciones han demostrado fehacientemente las ventajas que conlleva la modelización de la distribución espacial de datos hidrológicos.

Estos sistemas también permiten resolver cuestiones vinculadas con la delimitación de cuencas hidrológicas. Es un hecho constatado y común que la delimitación topográfica de cuencas no tiene por qué coincidir con los límites de las HRU. De hecho, hemos de recordar que estas áreas se delimitan atendiendo exclusivamente a la clasificación edafológica y de los usos del suelo, y no a la topografía. Por esa razón, si deseamos conocer la cantidad total de escorrentía que le corresponde a una subcuenca, necesitaremos ejecutar las funciones de superposición de polígonos. La escorrentía total es igual a la suma de las cantidades de agua contenidas por los polígonos completos y los fragmentos de polígonos de las HRU que quedan en el interior de la subcuenca.

Los investigadores en hidrología encuentran cada vez más efectivo el uso de los SIG debido a su gran capacidad para gestionar datos distribuidos y referenciados en el mundo real. Actualmente las aplicaciones hidrológicas están prestando una mayor atención a los modelos que contemplan la componente espacial y temporal de los datos, desarrollando a su vez métodos de programación orientada a objetos.

2.6. Limitaciones de los SIG en la modelación hidrológica

- Los modelos de distribución de parámetros hidrológicos son creados con el propósito de representar el comportamiento espacial de los elementos que mejor se ajustan a la gestión integrada de cuencas. Los algoritmos utilizados en estos modelos con frecuencia se basan en experimentos a escala de laboratorio y pequeñas parcelas en donde las características del suelo están bien definidas. Cuando estos parámetros se aplican a grandes cuencas o subcuencas las diferencias entre escalas requieren procesos de generalización de datos que socavan la validez del modelo (Morad, y otros, 2001).

- La mayor parte de las mediciones hidrológicas en los SIG asumen algún grado de error. Variables como la topografía y los suelos son comunes en todos los modelos hidrológicos, aunque cada vez son más necesarias informaciones espaciales específicas. En este sentido los sistemas remotos están siendo muy utilizados como fuente de datos (Giles, 1994). Sin embargo, la interpolación y generalización de información con diversos orígenes inducen múltiples errores que deben ser controlados.

- En recientes estudios sobre errores en los SIG, Chouldhry (1997b) ha demostrado que los métodos de generalización pueden crear datos que comprometen significativamente la fiabilidad de los modelos hidrológicos. En una prueba realizada sobre un área de 88 km², 3.67 se perdieron tras el proceso de generalización con una tolerancia de limpieza de 50 metros. Sin embargo, con una tolerancia de 4 metros no se encontraron efectos negativos destacados en

las características hidrológicas del área. Estos estudios abogan por sacrificar el tiempo de procesamiento de los

datos y el tamaño de los mismos para conseguir una exactitud verificable. En este sentido los avances experimentados en geoestadística están proporcionando útiles técnicas para la interpolación y cuantificación del error. Precisamente, Atkinson (1999) ha estudiado la inserción de geoestadísticas en programas informáticos basados en plataformas SIG, sobre todo de cara a su uso en muestreos, evaluación y propagación de errores.

- La integración en los SIG de los procesos hidrológicos de aguas superficiales y subterráneas aún no está muy lograda. El principal problema reside en la combinación de estos procesos con la escala, el espacio y el tiempo. Un mapa puede ser dibujado a cualquier escala, pero no está claro hasta qué punto los modelos pueden ser aplicados a diferentes escalas (Maidment, 1996).

El software utilizado en el desarrollo de este trabajo de tesis es el SIG ArcInfo 9.2 elaborado por la compañía ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc.), debido a que es uno de los SIG más completo y poderoso del mercado para la manipulación de datos georeferenciados y ser uno de los más amigables para los usuarios.

Este SIG viene programado con extensiones como *Geostatisticalanalyst tool* que proporciona avanzadas herramientas estadísticas para la generación de superficies y para el análisis de conjuntos de datos y mapeo continuo, estas herramientas de análisis exploratorio de datos espaciales permiten comprender acerca de la distribución de los datos y de los valores extremos locales, el nivel de espacio de autocorrelación, y la variación entre los conjuntos de datos múltiples o la extensión *Spatialanalyst tool* que proporciona una amplia gama de modelos raster de gran alcance y características de análisis que permiten a los usuarios crear, consultar, cartografiar y analizar fenómenos basados en celdas de datos (ESRI, 2006).

3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en el presente proyecto se basa en la aplicación de conceptos hidrológicos y herramientas SIG con la finalidad de caracterizar el comportamiento hídrico de una cuenca y estimar la variación de la infiltración o RVP, parámetro clave en la planificación y gestión de los recursos hídricos.

La información usada para realizar el estudio, incluye aspectos hidrológicos, topográficos, meteorológicos y edafológicos. El cálculo de la RVP se determinó mediante un balance hidrológico. Usando datos climatológicos, mapas digitales de uso y tipo de suelo, métodos de interpolación, álgebra de mapas y tecnología SIG, los componentes del balance hidrológico fueron estimados para la zona de estudio. En la figura 3.1 se presenta un diagrama de flujo que muestra el desarrollo metodológico de este trabajo.

3.1. Recopilación bibliográfica

Con la finalidad de entender conceptualmente el problema en cuestión, se efectuó una exhaustiva búsqueda de información bibliográfica que incluyó revistas especializadas, artículos oficiales, libros de texto, trabajos de tesis, mapas digitales, datos climatológicos y recursos en internet. Una vez recopilada, analizada y entendida la información existente fue posible desarrollar una logística que facilitó todas las labores relacionadas con este trabajo de tesis.

3.2. Modelo conceptual

Cada microcuenca presenta características únicas que la identifican y diferencian de su entorno. Sin embargo, los procesos hidrológicos que en ellas se desarrollan son similares (precipitación, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento). En este contexto, la predicción y el modelado digital representan una alternativa interesante para la generación de información hidrológica de variables dinámicas como las precipitaciones, los caudales y la pérdida de suelos (Belmonte, 2006).

Existen numerosos métodos que permiten estimar estas variables a nivel de cuencas hidrográficas. Por ejemplo, para la estimación de precipitaciones y evapotranspiración se utilizan interpolaciones o triángulos de Thiessen, entre otros. Sin embargo el cálculo y la aplicación tradicional de las fórmulas resultan muy complejas e incluso imprácticas para resolverse sin ayuda de un ordenador. De esta manera un SIG se convierte en una herramienta práctica y útil para facilitar los procesos de cálculo referidos como datos espaciales.

La idea básica de este trabajo es desarrollar una metodología que permita estimar la lámina de RVP en una cuenca utilizando un SIG. La inclinación por esta herramienta se debe a que este tipo de software emplea archivos en formato tipo raster y vectorial por lo que es posible emplear funciones de superposición, operaciones de tabla, métodos de interpolación y álgebra de mapas entre otros y así poder estimar los parámetros hídricos de una cuenca de una manera más detallada.

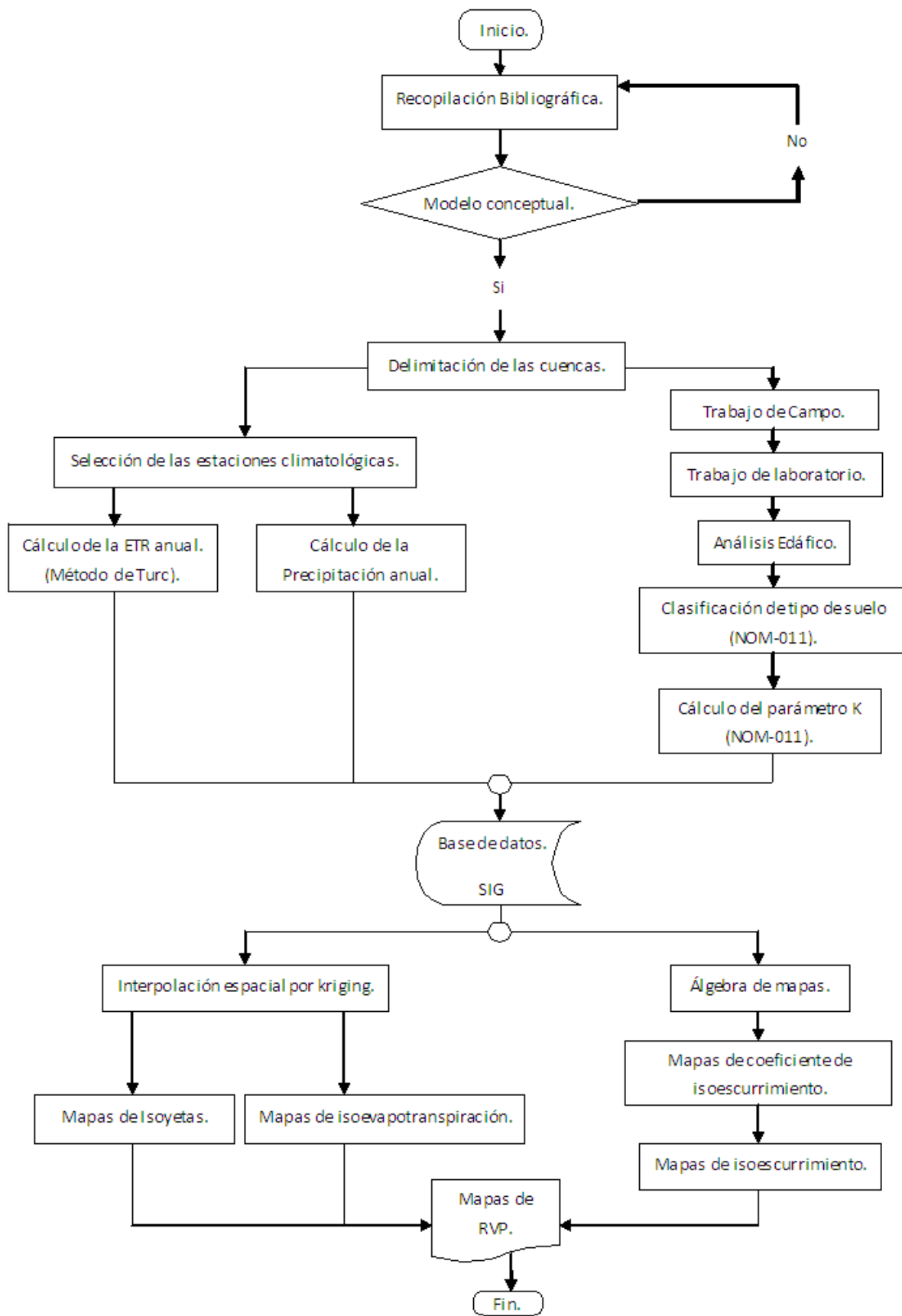


Figura 3.1. Desarrollo metodológico de este trabajo.

3.3. Delimitación de las cuencas

Los límites de una cuenca hidrográfica se encuentran definidos por una línea imaginaria llamada divisoria. Una divisoria es la línea que separa las precipitaciones que caen en las cuencas inmediatamente vecinas y que encaminan la escorrentía resultante para uno u otro sistema fluvial. La divisoria sigue una línea rígida, atravesando el curso de agua solamente en el punto de salida. La divisoria une todos los puntos de máxima cota dentro de una cuenca, lo que no impide que dentro de una cuenca no existan picos aislados con una cota superior a cualquier punto de la divisoria (Sáenz, 1999).

En primera instancia se delimitó de la divisoria de manera manual analizando cartas topográficas de INEGI 1:50,000. Posteriormente mediante Modelos Digitales de Elevación (MDE) descargados de la página de INEGI (<http://mapserver.inegi.org.mx/DescargaMDEWeb>) y aplicando las herramienta programadas en el software ArcInfo 9.2 se delimitaron de manera digital las cuencas a ser estudiadas.

Para delimitar las cuencas en estudio en un SIG, se parte de un MDE y mediante un análisis visual utilizando como base de calibración las cuencas delimitadas en el mapa cartográfico impreso de INEGI 1:50,000, se descartan las microcuencas generadas por el SIG, o bien, se agruparon como parte de cuencas mayores. Las claves de los MDE descargados de la página de INEGI son los mostrados en la tabla 3.1 y la figura 3.2 muestra el mosaico ensamblado en el SIG a partir de los MDE.

Tabla 3.1. Claves de los MDE utilizados. Fuente www.inegi.org.mx.

F13D42	F13D43	F13D44	F13D45
F13D52	F13D53	F13D54	F13D55
F13D62	F13D63	F13D64	F13D65
F13D72	F13D73	F13D74	F13D75
F13D82	F13D83	F13D84	F13D85

Finalmente la zona de estudio se dividió en cuatro microcuencas (figura 3.3) las cuales fueron sometidas a análisis hidrometeorológicos (la descripción de las características de dichas microcuencas se mencionan en el capítulo 4).

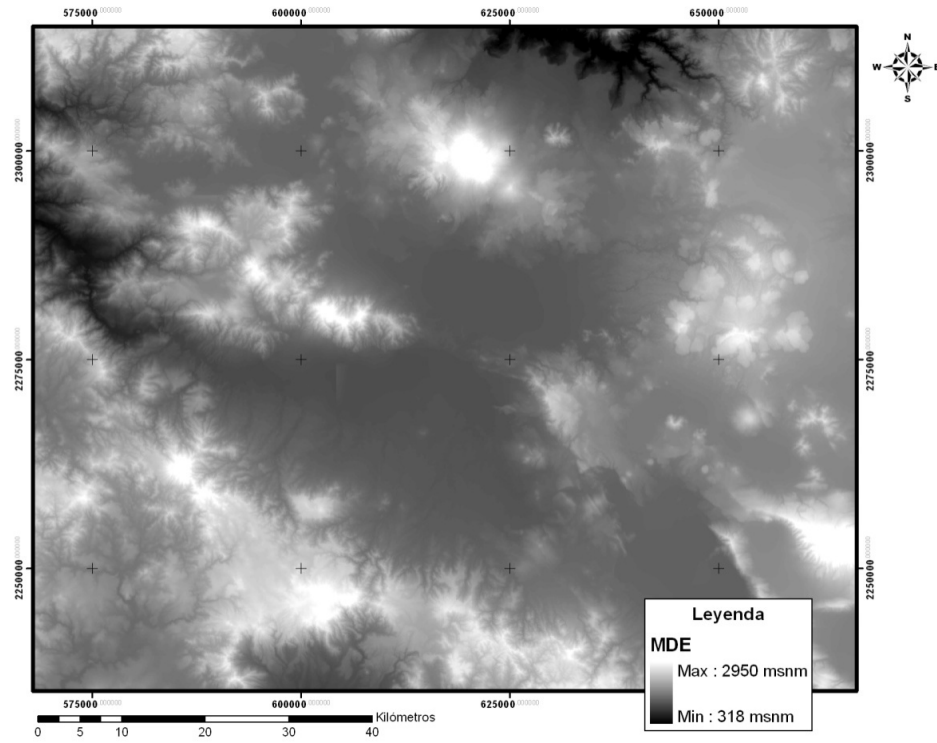


Figura 3.2. Imagen ensamblada a partir de los MDE obtenidos de INEGI

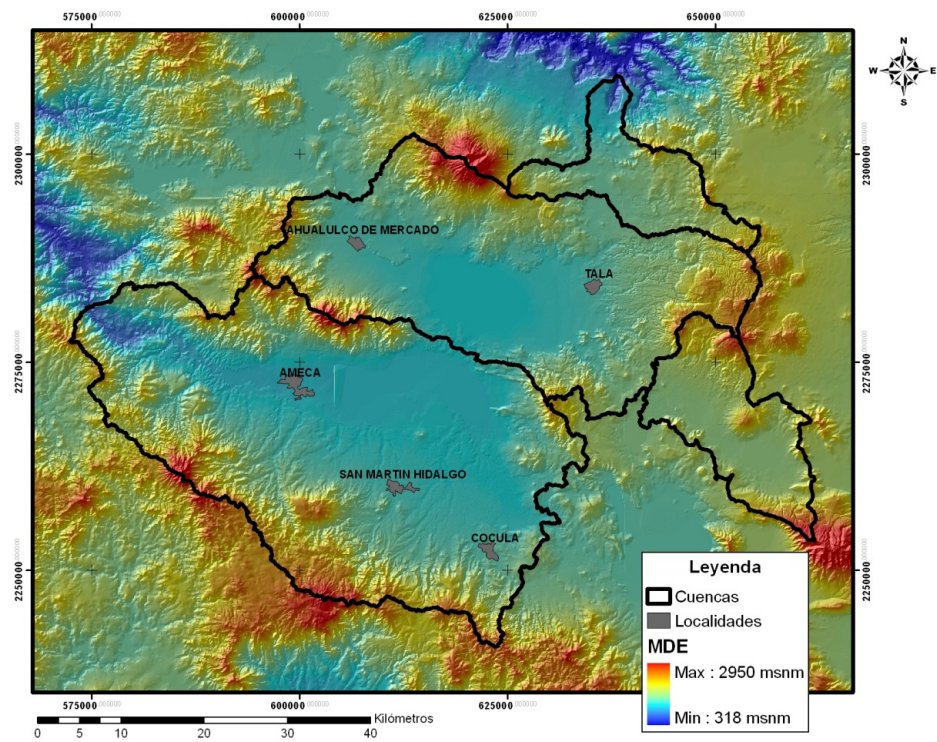


Figura 3.3. Cuencas delimitadas a partir de los MDE de INEGI con ayuda de la herramienta SIG.

3.4. Selección de las estaciones climatológicas

Debido a que las características hidrológicas de una cuenca están en función de las condiciones climáticas que en ella se presenten, fue indispensable realizar un análisis de los registros de las estaciones climatológicas que se encontraran dentro de las cuencas en estudio y cercanas a ellas (tabla 3.2 y figura 3.4), con el objetivo de seleccionar aquellas estaciones que presentarán los mejores registros históricos para generar una base de datos cualitativa y cuantitativa de los parámetros de precipitación y temperatura del área de estudio. Los pasos seguidos durante es procesado de datos climatológicos se mencionan a continuación.

- Obtención de datos climatológicos.

Una vez seleccionadas las estaciones climatológicas susceptibles a ser procesadas, se procedió a solicitar los registros históricos de dichas estaciones en el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

- Validación de datos.

Con el fin de obtener una base de datos amplia y confiable que permitiese estimar una distribución espacial y temporal de los parámetros de precipitación acumulada anual y temperatura media anual, se llevó a cabo un proceso de discretización para cada estación climatológica, que consistió en asignar porcentaje de fidelidad a los años con registro para cada una de las estaciones y sólo se consideran para cada estación los años con un porcentaje de fidelidad $\geq 75\%$ (lo que corresponde con un registro mínimo de nueve meses en un año) este porcentaje de fidelidad se calculó de la siguiente manera.

$$\%fidelidad = \frac{n}{12} * 100\% \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.1.}$$

Donde:

n =es el número de meses con datos en un año.

Tabla 3.2. Localización de las estaciones climatológicas en el área de estudio.

CLAVE	NOMBRE	ESTADO	MUNICIPIO	LAT	LON
14041	Chiquilistlán	Jalisco	Chiquilistlán	20.08333	-103.85000
14013	Atemajac De Brizuela	Jalisco	Atemajac De Brizuela	20.13333	-103.71667
14143	Tecolotlán (Dge)	Jalisco	Tecolotlán	20.20000	-104.05000
14301	Tenamaxtlan	Jalisco	Tenamaxtlan	20.21667	-104.15000
14168	Zacoalco De Torres (Smn)	Jalisco	Zacoalco De Torres	20.23333	-103.56667
14309	Atengo (Dge)	Jalisco	Atengo	20.26667	-104.31667
14014	Atengo (Smn)	Jalisco	Atengo	20.28333	-104.25000
14064	Ex-Hacienda San Diego	Jalisco	Cocula	20.41667	-103.88333
14163	Villa Corona	Jalisco	Villa Corona	20.41667	-103.68333
14130	San Martín Hidalgo (Dge)	Jalisco	San Martín Hidalgo	20.43333	-103.95000
14002	Acatlán De Juárez	Jalisco	Acatlán De Juárez	20.43333	-103.58333
14113	Presa Hurtado	Jalisco	Acatlán De Juárez	20.46667	-103.65000
14294	Tlajocomulco De Zuñiga (Smn)	Jalisco	Tlajomulco De Zuñiga	20.46667	-103.45000
14056	El Salitre	Jalisco	San Martín Hidalgo	20.53333	-103.81667
14009	Ameca (Smn)	Jalisco	Ameca	20.55000	-104.05000
14089	La Vega (Dge)	Jalisco	Teuchitlán	20.59167	-103.85833
14316	Guachinango (Dge)	Jalisco	Guachinango	20.60000	-104.51667
14297	Guachinango (Smn)	Jalisco	Guachinango	20.63333	-104.48333
14132	Tlaquepaque (Smn)	Jalisco	Tlaquepaque	20.63333	-103.30000
14281	La Vega (Ffcc)	Jalisco	Teuchitlán	20.66667	-103.80000
14066	Guadalajara (Dge)	Jalisco	Guadalajara	20.68333	-103.35000
14188	Teuchitlán (Smn)	Jalisco	Teuchitlán	20.70000	-103.83333
14121	Guadalajara (Rayón)	Jalisco	Guadalajara	20.70000	-103.38333
14065	Guadalajara (Smn)	Jalisco	Guadalajara	20.71667	-103.38333
14329	La Experiencia (Dge)	Jalisco	Guadalajara	20.71667	-103.33333
14333	Ahualulco (Dge)	Jalisco	Ahualulco De Mercado	20.73333	-103.93333
14115	Puente Arcediano (Cfe)	Jalisco	Guadalajara	20.73472	-103.28583
14338	Arenal (Dge)	Jalisco	Arenal	20.75000	-103.76667
14063	Etzatlan (Smn)	Jalisco	Etzatlan	20.76667	-104.10000
14195	Antonio Escobedo (Dge)	Jalisco	Antonio Escobedo	20.76667	-104.01667
14012	Arenal (Smn)	Jalisco	Arenal	20.76667	-103.75000
14010	Antonio Escobedo (Smn)	Jalisco	Antonio Escobedo	20.78333	-103.95000
14183	San Marcos (Smn)	Jalisco	San Marcos	20.80000	-104.18333
18044	Amatlán De Cañas (Dge)	Nayarit	Amatlán De Cañas	20.80611	-104.40278
14187	Tequila (Smn)	Jalisco	Tequila	20.90000	-103.83333
14169	Zapopan	Jalisco	Zapopan	20.90000	-103.38333
14136	Santa Rosa	Jalisco	Amatitlán	20.90556	-103.72639
14093	Magdalena (Smn)	Jalisco	Magdalena	20.93333	-103.96667

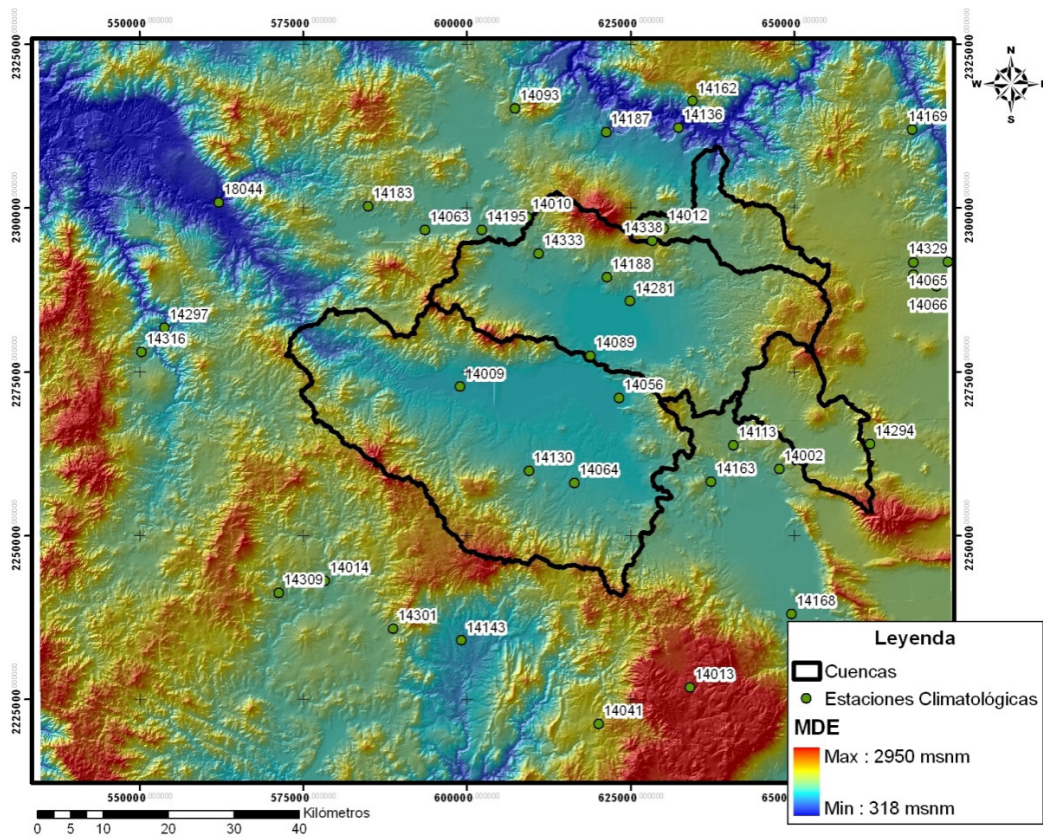


Figura 3.4. Ubicación de las estaciones climatológicas

- Selección de datos.

Para la selección de los datos a utilizarse en el cálculo de la lámina de precipitación y evapotranspiración anual fue necesario primero seleccionar una serie de años con el mayor número de estaciones climatológicas que tuviesen un porcentaje de fidelidad $\geq 75\%$ para los datos de precipitación media mensual. Esto se debe a que en primer lugar la precipitación representa el fenómeno de mayor importancia dentro del ciclo hidrológico de cualquier cuenca y por otro lado, la evapotranspiración fue calculada por el método de Turc el cual está en función de la precipitación. Por otro lado el método geoestadístico de interpolación utilizado es más robusto a medida que se tienen mayor cantidad y calidad de datos.

En la figura 3.5 se observa que la serie de años con la mayor cantidad de estaciones climatológicas con un porcentaje de fidelidad $\geq 75\%$ va desde 1980 a 1989, por lo que esta serie de años fue seleccionada para analizar la variación de los parámetros hídricos del área de estudio. Se reitera que esta tesis no pretende estimar datos recientes de infiltración; más bien pretende generar una metodología sencilla para el cálculo de la variación espacial de la infiltración, por tal razón es fundamental seleccionar un lapso de tiempo con datos fieles.

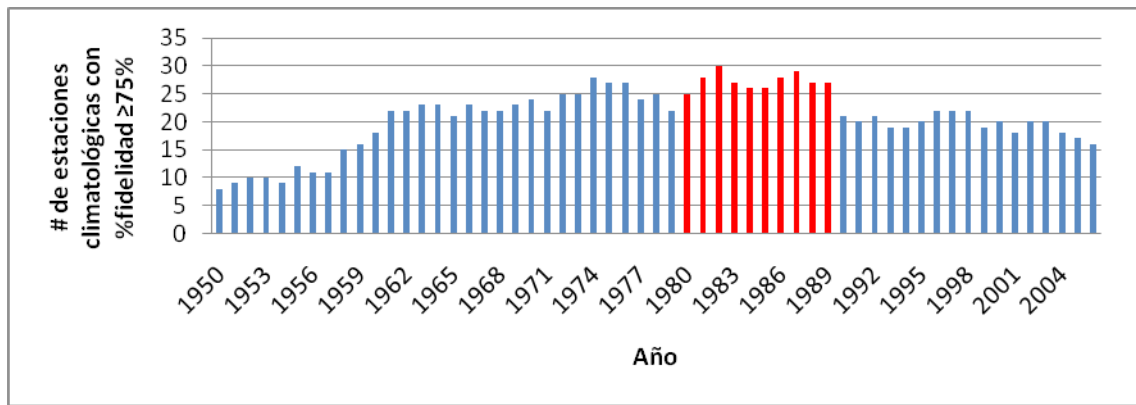


Figura 3.5. Número de estaciones climatológicas con porcentaje de fidelidad ≥75%. Donde las barras en rojo representan la serie de años seleccionada.

- Datos faltantes.

Usualmente los registros tomados en las estaciones climatológicas suelen estar incompletos, debido a daños en los equipos de medición o bien por negligencia de los operadores, pero como en la hidrología se trabaja con series continuas, se deben contemplar dichos datos faltantes.

La metodología empleada fue colocar el valor de la lámina de precipitación y temperatura media histórica mensual (según sea el caso), en el mes faltante sólo en aquellos años donde la estación climatológica tenga un porcentaje de fidelidad ≥ 75%.

Las tablas 3.3 y 3.4 se muestran unos ejemplos de las bases de datos procesada de la lámina de precipitación mensual y temperatura media mensual de los años seleccionados para la estación climatológica 14301 Tenamactlan.

Esta estación, por ejemplo, no se consideró en los cálculos de precipitación ni evapotranspiración anual de la cuenca para el año de 1990 (fila en color amarillo) ya que sólo cuenta con cinco meses de registro de la lámina de precipitación mensual.

Una vez seleccionada la serie de años (80-89), las estaciones climatológicas a utilizarse para cada año y habiendo completado las series anuales; se calculó el valor de la lámina de precipitación anual y lámina de evapotranspiración anual para posteriormente generar una base de datos que al ser descargada en el SIG e interpolar dichos valores se obtuvieran mapas de la distribución espacial de los parámetros ya mencionados.

3.5. Cálculo de la lámina de precipitación anual

La lámina de precipitación acumulada anual (PAA) se calculó con la siguiente ecuación:

$$PAA = \sum P_i \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

P =lámina de precipitación mensual.

i =mes.

Tabla 3.3. Base de datos de la lámina de precipitación mensual para la estación climatológica 14301 durante los años 1980-1989³

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMU- LADO	MEDIA ANUAL	MESES CON REGISTRO
1980	115.0	33.4	0.0	0.0	2.0	205.4	215.7	267.6	143.4	94.5	37.0	29.0	1143.0	84.3	11
1981	88.5	16.0	5.5	7.0	23.0	130.9	298.2	103.4	96.7	81.1	4.9	4.4	859.6	71.6	12
1982	0.0	12.8	0.0	26.1	58.3	156.9	213.5	212.5	101.7	44.8	104.9	52.7	984.2	82.0	12
1983	20.6	0.0	5.3	0.0	71.0	108.6	116.5	229.7	212.1	18.4	40.1	0.0	822.3	74.3	11
1984	37.2	1.0	0.0	0.0	27.4	201.3	204.1	247.1	152.2	52.2	10.2	20.9	953.6	79.5	12
1985	15.3	10.8	0.0	0.0	33.7	203.2	302.3	288.3	199.4	52.9	28.8	4.4	1139.2	109.5	10
1986	0.0	0.0	7.9	0.0	32.6	124.3	228.0	210.1	209.1	121.5	22.2	2.5	958.2	79.8	12
1987	11.2	45.8	0.0	0.0	16.6	220.2	351.7	153.3	80.9	21.8	7.4	5.3	914.2	76.2	12
1988	0.0	0.0	21.9	0.0	0.0	235.6	209.9	170.5	177.4	15.9	0.0	2.2	833.4	69.5	12
1989	0.0	12.5	0.0	7.0	0.0	66.7	130.2	241.9	148.2	86.7	23.0	42.7	758.9	63.2	12
1990	1.2	16.0								72.9	0.0	6.6	96.7	19.3	5
1991	0.0	1.5	9.5	0.0	0.0	243.1	278.1	102.7	157.6	77.1	24.8	54.7	949.1	84.0	11
1992	448.7	27.1	5.3	7.4	183.9	91.0	264.6	232.6	91.1	173.8	66.3	39.9	1631.7	147.9	11
MINIMA HISTORICA	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	66.7	107.5	88.5	79.5	5.3	0.0	0.0			
MAXIMA HISTORICA	448.7	47.0	63.5	74.4	183.9	308.5	372.6	288.3	406.7	173.8	134.0	54.7			
MEDIA HISTORICA	31.0	10.8	5.3	5.2	33.7	187.6	215.7	192.3	160.8	72.2	24.8	15.6			
DESV. ES. HISTORICA	87.9	14.0	13.1	14.9	41.5	58.9	79.0	56.3	70.5	40.9	32.9	17.6			

³ Los valores en color rojo corresponden a los datos llenados con la media histórica mensual para los años con un porcentaje de fidelidad $\geq 75\%$.

Tabla 3.4. Base de datos de la temperatura media mensual para la estación climatológica 14301 durante los años 1980-1989⁴

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ACUMULADO	MEDIA ANUAL	MESES CON REGISTRO
1980	17.9	19.1	19.3	20.1	23.3	24.0	21.8	21.7	21.8	20.9	18.0	17.1	223.2	20.3	11
1981	14.8	17.7	18.3	21.2	22.0	22.1	21.5	21.9	22.5	21.1	19.1	16.6	238.7	19.9	12
1982	17.0	17.3	20.2	22.7	23.8	24.6	22.1	21.7	21.6	20.7	17.7	14.3	243.7	20.3	12
1983	14.4	14.3	19.4	19.4	23.3	24.1	22.4	21.3	21.9	21.5	18.1	17.0	217.6	19.8	11
1984	15.9	16.3	19.1	21.0	22.4	22.4	21.1	21.5	20.7	20.3	18.4	17.5	236.7	19.7	12
1985	15.2	17.6	19.6	20.6	23.4	22.4	21.3	21.6	21.8	21.0	18.1	16.9	198.6	19.9	10
1986	16.4	17.0	18.4	22.7	23.8	22.8	21.6	21.9	21.5	19.7	19.2	16.3	241.3	20.1	12
1987	15.7	15.8	18.1	20.1	22.1	23.4	22.1	22.3	23.1	20.2	18.8	17.3	238.9	19.9	12
1988	16.1	18.3	18.6	21.8	23.3	23.4	22.0	22.0	22.1	20.9	19.2	17.2	244.9	20.4	12
1989	17.2	18.4	18.5	21.6	23.7	24.8	22.3	21.9	21.1	21.0	19.0	16.1	245.7	20.5	12
MINIMA HISTORICA	14.4	14.3	16.5	19.4	21.4	21.9	20.2	20.5	19.9	19.7	16.1	14.3			
MAXIMA HISTORICA	17.9	20.1	21.7	24.1	25.8	25.5	23.1	22.9	23.2	22.4	21.0	19.2			
MEDIA HISTORICA	16.4	17.6	19.4	21.5	23.4	23.5	21.8	21.8	21.8	20.9	18.7	17.1			
DESV. ES. HISTORICA	1.0	1.5	1.1	1.3	1.2	0.9	0.7	0.5	0.7	0.6	1.1	1.0			

⁴ Los valores en color rojo corresponden a los datos llenados con la media histórica mensual para los años con un porcentaje de fidelidad $\geq 75\%$.

3.6. Cálculo de la evapotranspiración anual

La evaporación directa a partir del suelo y la transpiración son procesos que se dan de forma simultánea pero no equitativa en la naturaleza, por lo que resulta complicado distinguir cuanto volumen de agua pasa a la atmósfera debido a cada proceso. Por tal razón se define el proceso de evapotranspiración, que engloba el cambio de estado de agua a la atmósfera tanto por evaporación directa, como por acción de las plantas.

Cabe mencionar, que mientras exista agua disponible, la evapotranspiración tendrá lugar a la mayor cuantía posible, dependiendo sólo de la cantidad de energía disponible y del control ejercido por la vegetación, si es que la hay. Cuando el suelo está seco o cuando la cantidad de agua en él empieza a disminuir, la tasa de evapotranspiración irá disminuyendo. Por tanto la cantidad de agua en la superficie del suelo, y la contenida en la zona radicular, sobretodo, es muy importante en los procesos de evapotranspiración (UJI, 2009).

La evapotranspiración real (ETR) se calculó con el método de Turc, basado en estudios de datos de 254 cuencas hidrográficas por todo el mundo (Sáenz, 1999). Propuso un método sencillo, basado en la temperatura y la precipitación.

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

P = precipitación acumulada anual (mm).

ETR = evapotranspiración real (mm).

L = es una función de la temperatura y precipitación.

$$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T^2 \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.4}$$

Siendo:

$$T = \frac{\sum ti * Pi}{\sum Pi} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

ti = temperatura media mensual (°C)

Pi = precipitación acumulada mensual (mm)

Si $\frac{P^2}{L^2} \leq 0.1$ se considera que $ETR = P$

La inclinación por el método de Turc para el cálculo de la evapotranspiración se debe a que es de fácil aplicación y las variables que utiliza son justamente los datos registrados por las estaciones climatológicas del SMN.

3.7. Base de datos

Posterior a la depuración estadística de los datos climáticos y con los cálculos de la precipitación anual y ETR anual, se generó una base de datos con la finalidad de realizar procesos geoestadísticos de interpolación.

Dicha base de datos contiene los valores de precipitación acumulada anual (PAA), temperatura media anual (TMA) y evapotranspiración real anual (ETR), de las estaciones climatológicas a utilizarse en cada año. Un ejemplo de dicha base de datos se presenta en la tabla 3.5, donde las filas en amarillo son las estaciones climatológicas no consideradas para el cálculo de la evapotranspiración durante este año por no contar con datos de temperatura.

3.8. Interpolación espacial por el método de kriging

La interpolación espacial es un procedimiento matemático utilizado para predecir el valor de un atributo en una localidad precisa a partir de valores obtenidos de puntos vecinos, ubicados en el área de estudio. La interpolación se utiliza para transformar un número finito de observaciones, por ejemplo cotas del terreno o precipitación, en un espacio continuo de manera que su patrón espacial sea comparable con aquel presentado por las observaciones puntuales de base (Burrough, 1998). Los fenómenos climatológicos (como la precipitación) ocurren en un área y lapso de tiempo definido de tal forma que la lluvia se puede expresar como una función aleatoria $Z(V)$ conocida por su registro histórico en un punto $Z(X_i)$.

El nombre del método apareció alrededor de 1960 para nombrar una técnica creada en Francia por Matheron a partir de los trabajos de D.G. Krige quien probablemente fue en usar la correlación espacial y del mejor estimador lineal insesgado en el campo de la evaluación de yacimientos minerales (Díaz, 2002). Kriging es una técnica de estimación local que proporciona el mejor estimador lineal imparcial posible de las características desconocidas del fenómeno en estudio, obteniendo el promedio ponderado de toda la información disponible (Obregón Andría, 2009).

En la estadística clásica, se manejan variables independientes, donde se asume cero continuidad (correlación) entre los datos. La Geoestadística por su parte, asume lo contrario, señalando que los datos están correlacionados y que esta continuidad se puede medir para puntos, bloques o volúmenes. Por lo tanto, en esta disciplina, se utiliza el concepto de variable regional que describe fenómenos, atributos con una distribución geográfica y con una cierta continuidad espacial (FAO, 2003).

Kriging es un método de cálculo de una variable regional en un punto, al interior de una superficie o dentro de un volumen usando un criterio de minimización de la estimación de la varianza. Para ello se resuelve un conjunto de ecuaciones utilizando la información presente en el variograma y las distancias relativas entre los datos y la posición del punto (o bloque/volumen) donde el valor interpolado es pedido. Estas ecuaciones contienen la covarianza entre el punto a ser estimado y los datos y las covarianzas entre los datos mismos. Kriging es un método de interpolación exacto en el sentido que su estimación en un punto de control coincide con el valor observado (FAO, 2003).

Obregón (2009), indica que la información requerida por el método consiste en:

- Un conjunto de datos conocidos (en este caso lámina de precipitación anual y lámina de evapotranspiración

anual).

- Geometría del muestreo, del panel o bloque a ser estimado y de sus interrelaciones.
- Información estructural, o sea, el modelo del semivariograma que caracteriza la variabilidad espacial de la zona de estudio, y los parámetros descriptivos de dicho modelo.

Para la generación de mapas de distribución isoyetas e isoevapotranspiración, se utilizó un programa auxiliar (SURFER 8.0), el cual se emplea como un programa trazador dado un archivo de datos interpolados (archivo .GRD), considerando un variograma lineal para todos los años.

Tabla 3.5. Base de datos generada para el año de 1982.

Donde: PAA=precipitación acumulada anual; TMA=temperatura media anual.

Clave	PAA	TMA	ETR Turc
14002	823.9	20.33942	614.1205
14009	699.7	21.96425	563.7088
14010	1177	20.11908	711.8846
14013	850.9	17.21308	574.1421
14014	854.597	20.63692	623.4553
14041	1088.76	17.76158	624.699
14056	833.6	21.55683	624.1589
14064	971	19.46208	633.2109
14065	807.5	19.43117	597.1865
14066	1033.8	21.22658	676.3827
14089	925.4	22.42342	675.633
14093	957.1	22.26067	683.8935
14113	855.9	20.19808	621.2769
14115	816	24.36792	637.6354
14121	1067	21.89275	695.2616
14130	911.8	21.19333	650.5358
14132	934.2	22.24117	664.8311
14136	841.6	26.624	665.0952
14162	825	25.07425	647.2959
14163	767.3	#DIV/0!	281.2745
14168	494	21.10192	447.0106
14169	910	20.58075	635.1413
14187	927.5	22.25383	658.5325
14281	911	#DIV/0!	286.3514
14301	984.2	20.31008	662.0215
14316	975.8	19.95342	650.4091
14329	788	21.4075	604.1605
14333	672.19	20.84383	549.8638
14338	908.9	21.26992	651.9551
18044	708.8	24.49333	576.3307

3.9. Cálculo del escurrimiento

El escurrimiento se obtuvo aplicando la metodología de la NOM-011-CNA-2002 en ella se explica que el coeficiente de escurrimiento () es función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual, de la cuenca en estudio.

Con apoyo en los servicios del INEGI y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 3.6 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K (tabla 3.7).

Tabla 3.6. Clasificación del tipo de suelo según la NOM-011-CNA-2002.

Tipo de suelo	Características
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess ⁵ poco compactos.
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de media profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terreno migajosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Si en la cuenca en estudio, existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas (K ponderada).

Una vez obtenido el valor de K , el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se calcula mediante alguna de las siguientes fórmulas:

$$\text{Si } K \text{ es menor o igual que } 0.15 \quad Ce = \frac{K(P-250)}{2000} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.6.}$$

$$\text{Si } K \text{ es mayor que } 0.15 \quad Ce = \frac{K(P-250)}{2000} + \frac{(K-0.15)}{1.5} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.7.}$$

Donde P = Precipitación anual, en mm. Y las fórmulas se considerarán válidas para valores de precipitación anual entre 350 y 2150 mm.

El Ce es una relación matemática que involucra el volumen de escurrimiento anual (Ve), entre el volumen de precipitación anual (Vp) correspondiente.

$$Ce = \frac{Ve}{Vp} \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.8.}$$

Donde:

$$Ve = A * E \text{ (área de la cuenca*lámina de escurrimiento)}$$

$$Vp = A * P \text{ (área de la cuenca*lámina de escurrimiento).}$$

⁵ Cabe mencionar que a pesar de que se consideren en una norma oficial mexicana en México no existen Loess, por lo que esta clasificación tendría que ser revisada por las autoridades.

Tabla 3.7. Valores de k según la NOM-011.

USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0.26	0.28	0.30
Cultivos:			
En Hilera	0.24	0.27	0.30
Legumbres o rotación de pradera	0.24	0.27	0.30
Granos pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0.14	0.20	0.28
Del 50 al 75% - Regular -	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% - Excesivo -	0.24	0.28	0.30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto del 50 al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto del 25 al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos del 25%	0.22	0.28	0.30
Zonas urbanas	0.26	0.29	0.32
Caminos	0.27	0.30	0.33
Pradera permanente	0.18	0.24	0.30

Ya que el valor del área de la cuenca es el mismo para los dos volúmenes, se puede decir que:

$$C_e = E/P \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.9.}$$

Por lo que:

$$E = C_e * P \dots\dots\dots \text{Ecuación 3.10.}$$

Esta metodología se acopló a una herramienta SIG la cual mediante operaciones de álgebra de mapas permite generar mapas de isoescorrentamiento. Los procedimientos llevados a cabo para el cálculo de los parámetros de los que depende el escurrimiento se mencionan a continuación.

3.9.1. Análisis edáfico

La NOM-011 clasifica los suelos según lo ya comentado en la tabla 3.6. Sin embargo la clasificación de los suelos presentes en el área de estudio no fue tan sencilla como parece, ya que para ello se requirió de la recolección de muestras en campo para su posterior análisis en laboratorios con objeto determinar algunas de sus propiedades hidráulicas y dar una clasificación adecuada según la NOM-011.

3.9.1.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo se desarrolló durante los días 14 a 19 de enero de 2009, en los municipios de Amatitlán, Ameca, Tequila y el Arenal, todos en el estado de Jalisco, al oeste de la ciudad de Guadalajara, con objeto de realizar puntos de verificación y muestreo edafológicos.

Se llevaron a cabo actividades de reconocimiento en el área de estudio mediante cartografía de INEGI, de tal forma que se determinó la distribución más adecuada de los puntos de verificación edafológicos, tratando de que éstos fueran representativos de la zona de estudio. Se recolectaron muestras, mismas que se analizaron en el Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM, con la finalidad de obtener información cuantitativa y cualitativa de algunas de las principales propiedades físicas del suelo y de esa manera darle una adecuada clasificación según lo dictado en la NOM-011.

El muestreo consistió en un total de 5 puntos de verificación edafológicos en los suelos más representativos de la zona (figura 3.6), donde se tomaron un total de 8 muestras de suelo de los horizontes o capas más sobresalientes de los perfiles estudiados. Se trató de que la selección de los puntos de muestreo fuera representativa de las unidades edáficas presentes en las cuencas tomando en cuenta la cartografía de digital de INEGI, considerando las limitaciones por el factor de escala.

Las descripciones de campo, fotografías y ubicación geográfica de los puntos de verificación edafológicos se muestran en los formatos señalados en el anexo 1.

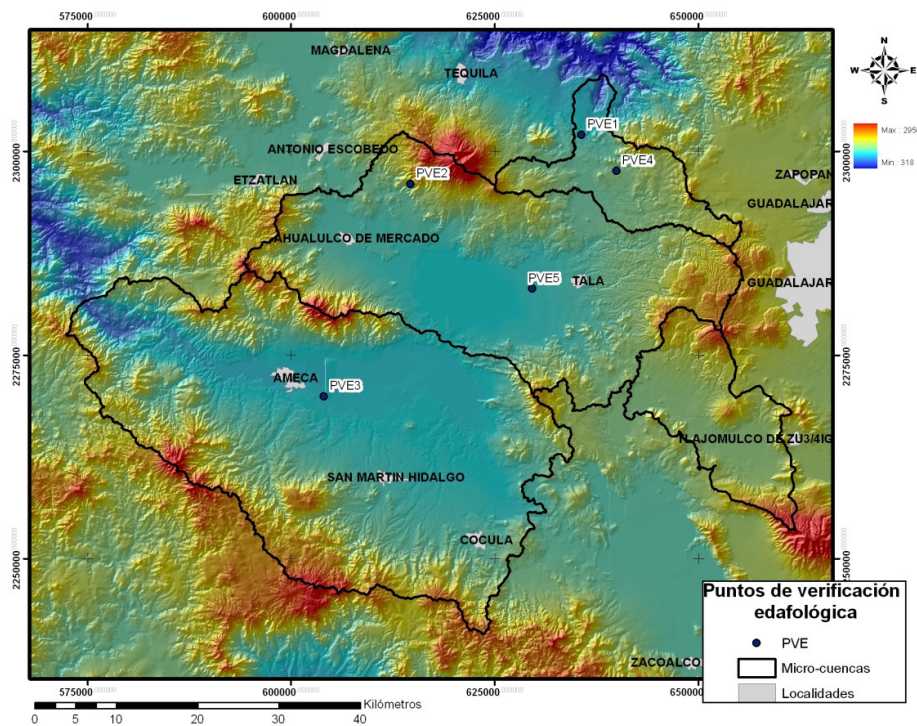


Figura 3.6. Puntos de verificación edafológicos.

3.9.1.2 Trabajo de laboratorio

Todas las muestras de suelo recolectadas durante el trabajo de campo fueron preparadas para su análisis en el Laboratorio de Física de Suelos del Instituto de Geología de la UNAM, con el fin de determinar algunas de sus propiedades hidráulicas y clasificarlas según la NOM-011. Todas las muestras fueron tamizadas, seleccionándose para analizar solo la fracción <2 mm.

Es conveniente recordar que los sistemas de flujo en los suelos están condicionados por un patrón natural que los define como medios esencialmente heterogéneos y anisotrópicos. En la práctica llegar a medir este patrón natural ha sido muy difícil. Por lo tanto, parámetros físicos tales como la densidad aparente, humedad gravimétrica, textura, entre otros, considerados de manera conjunta resultan más convenientes para estudiar y explicar los procesos físicos en el perfil del suelo (Sánchez Morales, 2008). Los parámetros analizados se describen a continuación.

- Curvas de retención de humedad.

Los datos para la elaboración de estas curvas características de retención de humedad se obtuvieron usando una membrana de porcelana por el método de extracción con olla de presión (Klute, 1986). Las curvas de retención de humedad expresan la relación entre el contenido de humedad y su potencial de retención y dependen de los factores relacionados con el tamaño de las partículas del suelo y el tipo de arcillas presentes, por lo que este parámetro resulta importante para determinar la capacidad de infiltración del suelo.

El método consiste básicamente en saturar un cantidad pequeña de muestra mediante capilaridad y someterla a 0.1, 0.33, 1, 2, 4, 8, 12 y 15 bares mediante una olla de presión (figuras 3.7 y 3.8), con la finalidad de drenar el agua de la muestra a dichas presiones. Una vez sometida la muestra a estas presiones de drenado durante dos días, se pesó y se colocó en un horno a 110 °C dos días más, para ser pesada nuevamente, de tal forma que la diferencia de pesos entre la muestra parcialmente drenada y la muestra seca es la cantidad de agua retenida en el suelo para las diferentes presiones.



Figura 3.7. Muestras saturadas mediante capilaridad.



Figura 3.8. Olla de presión para el drenado de suelos.

- Densidad aparente, densidad real y porosidad.

Para la determinación de la densidad aparente (ρ_b) se aplicó el método del núcleo de volumen conocido (Carter, 1993). La densidad real (ρ_p) se obtuvo por el método del picnómetro (Flint, y otros, 2002). Dado que ρ_b representa la relación de la masa de suelo seco al volumen combinado de sólidos y poros, la relación ρ_b/ρ_p dará la fracción en volumen ocupada por los sólidos (Sánchez Morales, 2008).

Por lo tanto la fracción del volumen ocupado por el espacio poroso (St) resulta una herramienta más de interpretación para la clasificación de los suelos, dicha porosidad se calcula con la siguiente ecuación:

$$St=1-(\rho_b/\rho_p).....\text{Ecuación 3.11.}$$

3.9.2. Cálculo del parámetro K

Para el cálculo de dicho parámetro se siguió la metodología propuesta por la NOM-011 que considera el tipo y uso de suelo asignándole un valor de K a cada área con un tipo y uso de suelo específico.

Para ello se descargaron gratuitamente los mapas de uso de suelo y de edafología de la página de INEGI (http://mapserver.inegi.org.mx/data/inf_e1m/), en formato shape. Los mapas que ofrece INEGI se encuentran a escala 1:1000000 por lo que abarcan toda la república mexicana de tal forma que tuvo que ser necesario hacer una edición en el SIG (ArcInfo 9.2), para seleccionar los polígonos de usos de suelos que pertenecieran exclusivamente a las cuencas estudiadas.

La obtención de las áreas con sus diferentes K's se realizó mediante el software ArcInfo 9.2 con la herramienta "Intersection" que permite sobreponer los mapas digitales de uso de suelo y tipo de suelo (en formato vectorial) obteniendo subconjuntos a los cuales se les asignó un valor de K mediante un análisis en el SIG. Cabe mencionar que se consideraron todos los bosques y pastizales con una cobertura de 50%-75% por no contar con información suficiente.

Una vez conocidas las áreas correspondientes a las diferentes K's se calculó una ponderación. Se denomina media ponderada de un conjunto de números al resultado de multiplicar cada uno de los números por un valor particular para cada uno de ellos, llamado su peso y obteniendo a continuación la media aritmética del conjunto formado por los productos anteriores. Se utiliza la media ponderada cuando no todos los elementos de los que se pretende obtener la media tienen la misma importancia.

Para una serie de datos $X_i = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ a la que corresponden los pesos $W_i = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, la media ponderada se calcula como:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i * W_i}{\sum W_i} \dots \dots \dots \text{Ecuación 3.12.}$$

3.9.3. Mapas de coeficiente de isoescurrencia (Ce)

Los mapas de coeficientes de isoescurrencia se elaboraron mediante operaciones de álgebra de mapas. Uno de los usos fundamentales de los SIG es la obtención de nuevas capas de información a partir de otras previamente disponibles. Para ello se dispone de un conjunto de herramientas de cálculo con matrices de datos que reciben el nombre genérico de álgebra de mapas (Universidad de Murcia, 2010).

El operador utilizado para la elaboración de mapas de coeficiente de isoescurrencia fue la ecuación 3.7 donde K resulta constante para todos los años y la única variable de la ecuación es P que fue calculada mediante un método de interpolación lineal (Método de kriging). El álgebra de mapas se calculó con la herramienta "Raster Calculator" en el software ArcInfo 9.2 obteniendo así mapas de coeficientes de isoescurrencia para cada año del periodo seleccionado.

3.9.4. Mapas de isoescurrencia

Los mapas de lámina de isoescurrencia para cada año también fueron calculados mediante un álgebra de mapas programado en la herramienta "raster calculador" software ArcSIG 9.2. El operador utilizado fue la ecuación 3.10.

3.10. Mapas de RVP

Finalmente, los mapas de lámina de RVP se obtuvieron nuevamente mediante un álgebra de mapas utilizando el operador dado por la ecuación 1.2 donde los mapas de lámina de precipitación (P), lámina de evapotranspiración (ETR), y lámina de escurrencia (E), se encuentran en formato raster, dando como resultado un nuevo mapa en ese formato pero ahora mostrando la distribución espacial de la lámina RVP. De manera complementaria y con la finalidad de facilitar el análisis de la variación espacio-temporal de la RVP, se elaboraron mapas de isocoefficientes de RVP aplicando nuevamente procedimientos de álgebra de mapas en un SIG.

Este análisis se repitió para cada año del período seleccionado, los resultados y la discusión de estos se presentan con detalle en los capítulos 5 y 6 respectivamente.

4. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO NATURAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1. Localización del área de estudio

La zona de estudio se localiza en el centro de Jalisco, al oeste de la ciudad de Guadalajara en las coordenadas UTM proyección en el elipsoide WGS84 13 N dentro del polígono delimitado por las coordenadas de la tabla 4.1. En este estudio se evalúan las microcuencas de la figura 4.1.

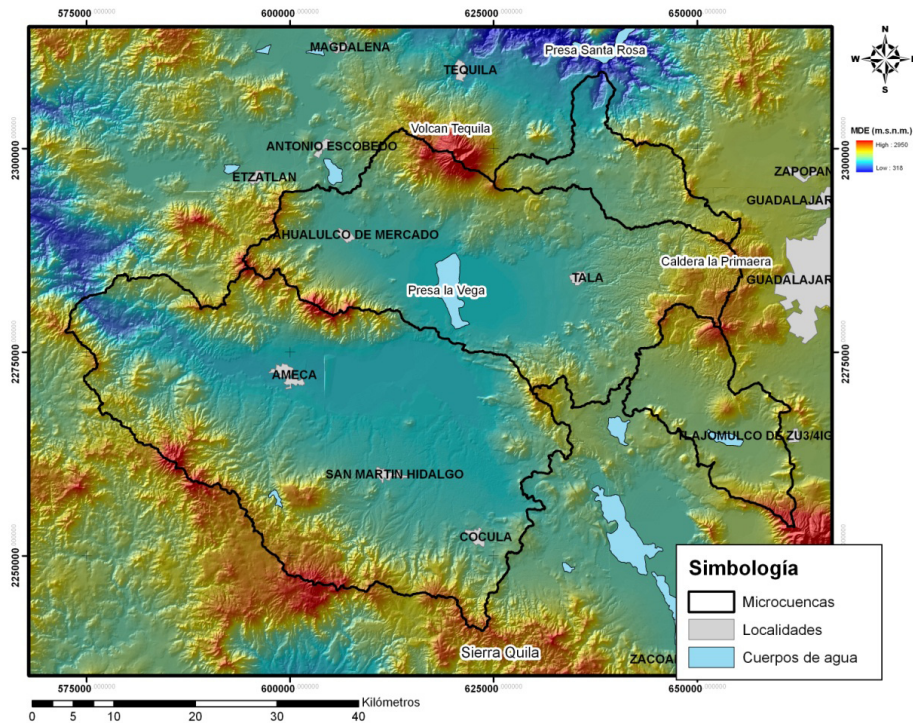


Figura 4.1. Localización del área de estudio.

Tabla 4.1. Coordenadas extremas del área de estudio

Vértice	X	Y
1	570000	2230000
2	570000	2320000
3	670000	2320000
4	670000	2230000

Los principales municipios presentes dentro del área de estudio y características más importantes se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Características de los principales municipios de la zona de estudio tomado de: <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/jalisco/mpios/municipios.htm> y <http://www.ceajalisco.gob.mx/index.html>, última visita diciembre del 2009.

Municipio	Superficie (km2)	Población 1995 (ha)	Tasa media anual de crecimiento 1990-1995	Población económicamente activa	Principales actividades económicas	Uso de Suelo	Clima	PAA (mm)	TMA (°C)	Dirección de los vientos dominantes	Agua entubada	Drenaje conectado a la red pública
Ameca	685.73	54555	0.60%	97.30%	Actividad agropecuaria, servicios comunales, sociales, personales y mantenimiento y la industria manufacturera	La tenencia del suelo en su mayoría corresponde a la propiedad ejidal	Semi-seco con otoño e invierno secos y semi-cálido; sin estación invernal definida	864	21.3	NW	94.58%	91.11%
Ahualulco de Mercado	157.2	19993	2.70%	98.25%	Actividad agropecuaria y la industria manufacturera	La mayor parte del suelo tiene un uso agrícola; la propiedad ejidal en el municipio existe en regular proporción, pero la tenencia de la tierra es en su mayoría privada.	Semiseco con invierno y primavera secos y semicálidos, sin estación invernal definida	871.4	21.3	N-NW	97.52%	93.87%
Cocula	451.98	25602	0.80%	96.66%	Actividad agropecuaria, servicios comunales, sociales, personales y mantenimiento y la industria manufacturera	La mayor parte del suelo tiene un uso agropecuario.	Semiseco con invierno y primavera secos y semicálidos, sin estación invernal definida.	808.9	19.9	N	96.95%	89.25%
San Martín Hidalgo	324.57	27269	0.50%	96.19%	Actividad agropecuaria, servicios comunales, sociales, personales y mantenimiento.	La mayor parte del suelo tiene un uso agropecuario y la tenencia de la tierra en su mayoría corresponde a la propiedad ejidal.	Semiseco con invierno y primavera secos, semicálidos, sin estación invernal definida salvo en la zona de la sierra	896	20.9	E-W	94.04%	87.60%
Tala	389.24	50928	2.30%	97.98%	Actividad agropecuaria y la industria manufacturera	La mayor parte del suelo tiene un uso agrícola. La tenencia de la tierra es proporcional entre la propiedad ejidal y la pequeña propiedad.	Semiseco con invierno y primavera secos, y semicálido sin estación invernal definida	1064.7	20	NW	95.43%	93.82%

PAA: Precipitación Anual Acumulada; TMA: Temperatura Media Anual.

4.2. Geología

En el estado de Jalisco, las principales estructuras geológicas son: aparatos volcánicos, coladas de lava, fracturas y fallas normales, que han dado origen a los valles y fosas tectónicas como la Laguna de Chapala. Los afloramientos rocosos de la entidad están constituidos por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas; con edades de formación del triásico hasta el cuaternario reciente. Las rocas metamórficas (esquistos) del Triásico y Jurásico son las más antiguas de la entidad sin embargo existen pocos afloramientos de ellas, siendo las rocas ígneas extrusivas del Terciario las que predominan. Dentro del estado de Jalisco se encuentran parte de cuatro provincias geológicas: Sierra Madre Occidental, Mesa del Centro, Faja Volcánica Transmexicana (FVT) y Sierra Madre del Sur; con base a esta división se describen los aspectos geológicos de la entidad (INEGI, 2010).

El relieve de Jalisco se caracteriza por el predominio de las montañas y escasas de extensas llanuras. Desde el punto de vista de las estructuras del relieve en Jalisco predomina el estilo tectónico de “relieve de bloques”, en contraposición al estado de Michoacán donde sobresale el relieve volcánico joven sin grandes alteraciones tectónicas. El norte del estado es el dominio de los grandes bloques del “plateau riolítico” de la Sierra Madre Occidental, dispuestos longitudinalmente y separados por profundos valles de vertientes abruptas. El sur es la región de los macizos plutónicos que forman la estructura de la Sierra Madre del Sur. El oeste también es la región de los macizos plutónicos cuyos bloques conforman el sistema de la Sierra de Cacoma y de Perote, pero a diferencia de la anterior se desarrolla aquí un extenso piedemonte cuando la montaña no se aproxima al litoral del Pacífico. El este es el dominio de los altiplanos formados por las mesetas de los bloques elevados del “plateau riolítico” y de las llanuras aluviales formadas a expensas de la cuenca sedimentaria del río Verde. Finalmente el centro del Estado es una región de compartimentos, de alternancia montañas volcánicas o bloques de montañas y de valles o llanos de poca extensión como los de Atemajac, de Tesistán y de Ameca-Cocula. El graben de Chapala, ocupado parcialmente por el lago más extenso de México, forma también relieves planos que se prolongan en el vecino estado de Michoacán (Rosier Barrera, 2002).

La zona de estudio se encuentra ubicada en la zona central del estado de Jalisco dentro de la porción occidental de la FVTM, entre la costa de California y la unión triple de los rifts de Zocoalco, Chapala y Colima (Allan, 1986). (figura 4.2). Esta región está relacionada a la subducción de las placas de Cocos y Rivera desde el Mioceno medio. Es un campo volcánico constituido por depósitos emitidos durante el Pleistoceno con actividad volcánica que incluye flujos de lava, domos y conos. La actividad efusiva varía de composición riolítica a dacítica, hasta traquiandesítica y andesítica basáltica (Maldonado, 2007).

Las rocas volcánicas fueron extravasadas por estratovolcanes compuestos, derrames de fisura y conos volcánicos monogenéticos, que son las estructuras volcánicas más jóvenes en la zona de estudio. De manera local se aprecian los estratovolcanes El Arenal, Amatitán y Tomasillo los cuales están formados por flujos de lavas andesíticas a basálticas y emisiones de piroclastos y tobas de caída aérea con tonalidades rojizas (tezontle) a negras (tefras).

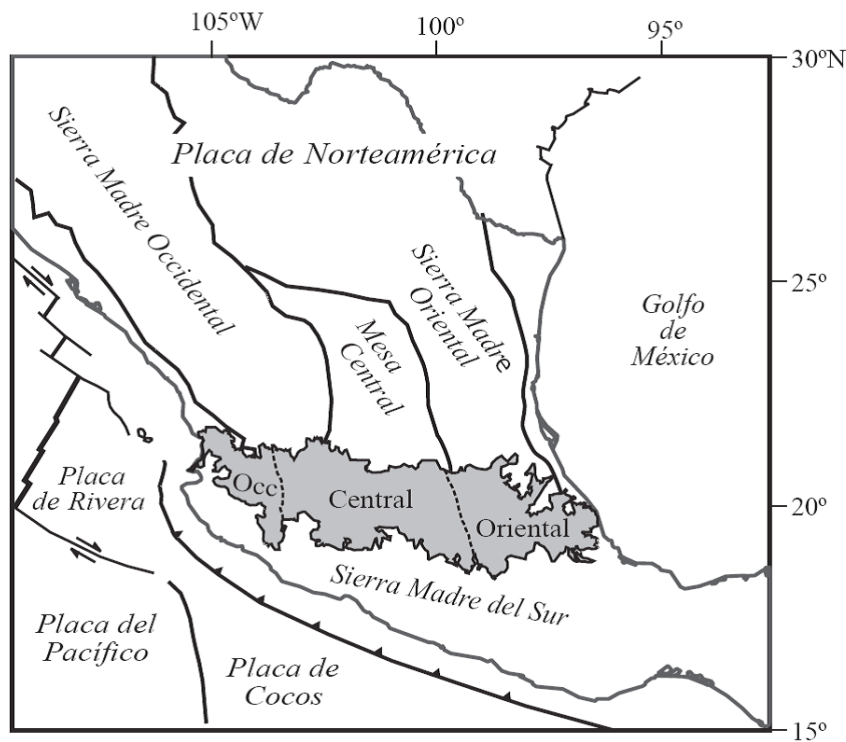


Figura 4.2. Ubicación del sector occidental (Occ) de la FVTM. Tomado de (Tuena Gomez, 2005)

Otro rasgo particular de la zona es la Caldera La Primavera en la zona circundante a la ciudad de Guadalajara, formada por un paquete de piroclastos de naturaleza ácida que contiene el mayor acuífero regional en el estado de Jalisco (acuífero Ameca). Al sur de la caldera se encuentra el denominado Punto Triple de Jalisco, formado por la convergencia de tres grandes fosas tectónicas: Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala. En la figura 4.3 se puede apreciar un mapa geológico elaborado a partir de los shap es descargables desde la página <http://mapserver.inegi.org.mx>.

En gran parte de la FVTM ha existido una estrecha relación espacio-temporal entre el fallamiento y el vulcanismo. En la porción occidental de la FVTM, Demant (1981), fue el primero en señalar la existencia de tres depresiones tectónicas organizadas en una junta triple al sur de Guadalajara, nombrando a esta estructura “Graben Tepic-Chapala” (posteriormente definido como Tepic-Zocoalco).

La estructura más sobresalientes del área de estudio es el Rift de Chapala, que fue definido inicialmente como un graben de dirección E-W formado en respuesta a una extensión N-S durante el Plioceno-Cuaternario (Garduño Monroy, 1993). Estudios posteriores demostraron que se trata en realidad de una estructura compuesta por dos semigrabens con vergencia opuesta: sur en la parte oeste y norte en la parte este (Rosas Elguera, 1998).

Esta actividad ígnea da como resultado una alternancia de los rasgos morfológicos (figura 4.4), donde se combinan montañas y bloques de montañas volcánicas de materiales básicos o ferromagnéticos con valles y llanos de escasa extensión y de amplias depresiones o fosas tectónicas ocupadas por lagos y lagunas (p.e. Chapala, Sayula, San Marcos, Atotonilco, etc.).

Es la región que reúne la mayor parte de los asentamientos humanos y de la actividad agropecuaria del Estado. Se trata de los llanos de Tala - Ameca - Cocula, de la planicie de Tesistán, de los llanos de Atemajac (mal llamado valle

de Atemajac), de los Llanos de Toluquilla, de los llanos de Chapala y La Barca, de las depresiones de Zacoalco y Sayula y del valle de Zapotlán. En esta región se instala la Zona Metropolitana de Guadalajara que alberga más del 60% de la población de Jalisco.

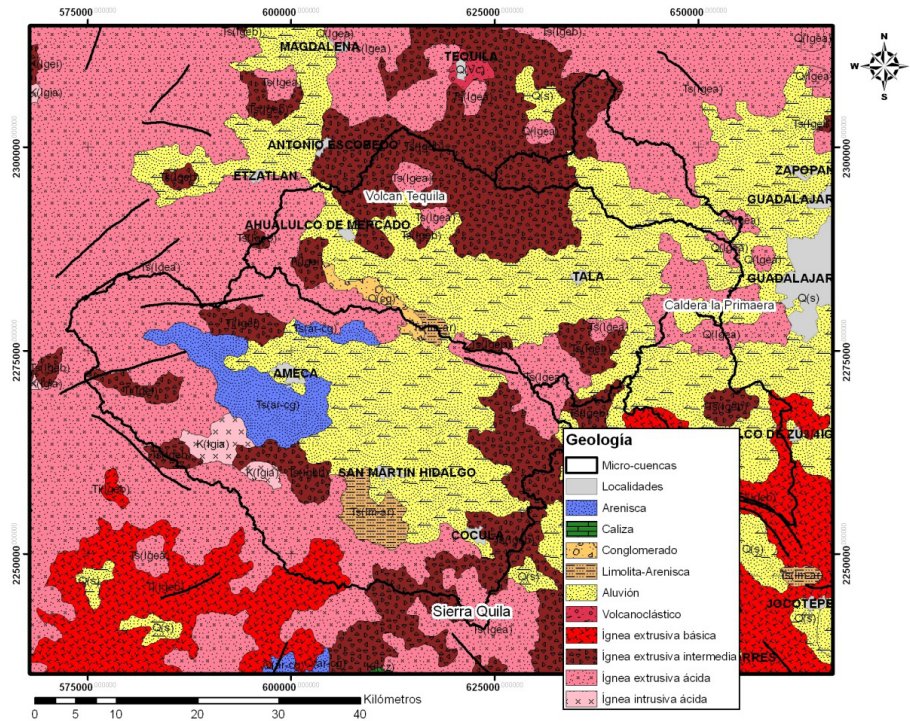


Figura 4.3. Geología de la zona de estudio. Elaborado a partir de mapas vectoriales de (INEGI, 2009).

4.2. Edafología y vegetación

Clima, relieve y litología se conjugan para dar lugar a una variedad de suelos cuya distribución se resume en consideración a las formas del relieve o las unidades geomorfológicas. Los Litosoles predominan en las vertientes de las montañas, en cambio los Regosoles se distribuyen sobre las planicies de piedemonte, principalmente de las montañas graníticas el oeste. En los llanos y valles del centro del Estado se desarrollan los Andosoles y Fluvisoles. En el este sobre los llanos de la fosa de Chapala predominan los gleysoles y los suelos hidromorfos. Los suelos limo-arcillosos ácidos se distribuyen en la cuenca del río Verde, al noreste del estado. En algunas zonas deprimidas como los lagos de Sayula, San Marcos, Zacoalcos y Atotonilco aparecen suelos salinos. En las altiplanicies, mesetas, y sobre algunos niveles pedemontanos y terrazas fluviales aparecen relictos de suelos ferruginosos, tales como los suelos rojos de Arandas (Rosier Barrera, 2002).

La cubierta vegetal en el medio tropical, mejor que en cualquier otra zona del planeta, refleja las relaciones entre el clima, el relieve y el suelo. Así pues en las zonas montañosas se presenta un perfil tipo de la distribución de las formaciones vegetales.

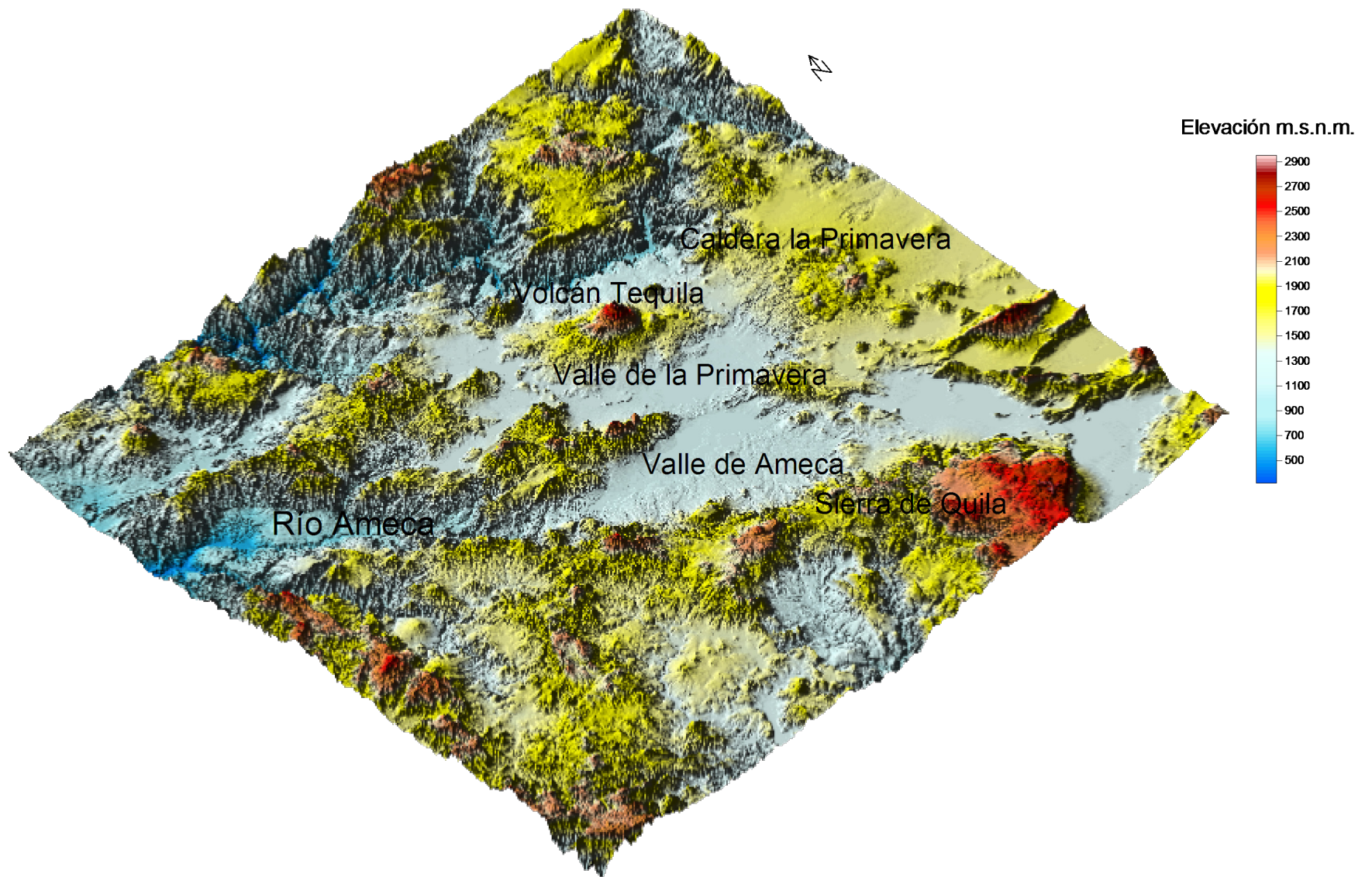


Figura 4.4. Rasgos morfológicos del área de estudio.

El bosque espinoso y el matorral xerófilo se extienden en las zonas bajas y planas; el bosque tropical caducifolio pertenece a las zonas bajas de las vertientes de las montañas; por encima de éste el bosque de encinos y en las partes más altas el bosque de pinos. En las montañas más húmedas, al bosque de encinos le sucede en altura el bosque mesófilo de montaña y el bosque de pinos y abetos. En las zonas de mayor precipitación y humedad de la costa del Pacífico se desarrolla la selva tropical subcaducifolia y la selva baja caducifolia que se asemeja al bosque tropical caducifolio del interior del Estado (Rosier Barrera, 2002).

De manera local y conforme con la cartografía digital disponible de INEGI en el área de estudio se encuentran diferentes unidades edáficas (figura 4.5). Dentro de las cuencas en estudio los Phaeozems háplicos se extienden por el 64.07% del área de estudio, siendo el tipo de suelo más predominante dentro de las cuencas, seguido por los Regosoles éutricos con 19.31%, los Vertisoles pélicos tienen un 9.04%, los Regosoles cálcicos con 3.42%, los Phaeozems lúvicos con 2.12% y por último los Luvisoles crómicos se extienden solo por el 2% de las área de estudio.

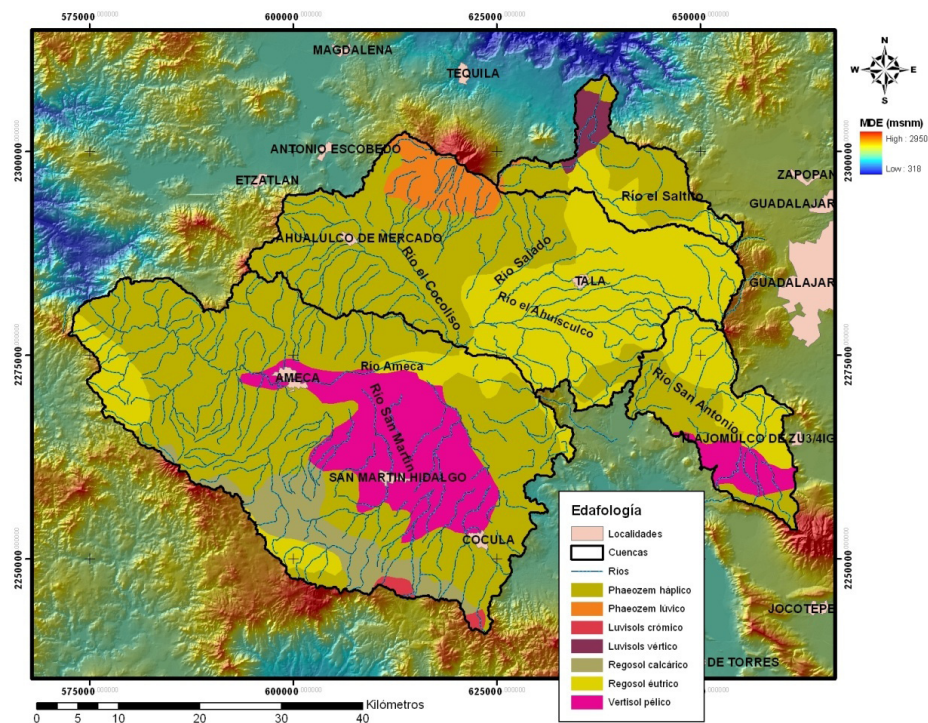


Figura 4.5. Mapa edafológico del área de estudio. Elaborado a partir de mapas vectoriales de INEGI

Según la Base Referencial Mundial del Recurso del Suelo (WRB por sus siglas en inglés), elaborada por la organización para la Agricultura y la Alimentación en el 2007 (FAO por sus siglas en inglés) los suelos anteriormente se pueden describirse de la siguiente manera:

Phaeozems

Los Phaeozems comprenden suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en un clima moderadamente continental. Los Phaeozems son muy parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados. Consecuentemente, tienen un horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con los Chernozems y Kastanozems, son menos ricos en bases. Los Phaeozems pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo.

Se desarrollan a partir de materiales parentales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess), till y otros. En ambientes cálidos a fresco (tierras altas tropicales) regiones moderadamente continentales, suficientemente húmedas de modo que la mayoría de los años hay alguna percolación a través del suelo, pero también con períodos en los cuales el suelo se seca; tierras llanas a onduladas; la vegetación natural es pastizal como la estepa de pastos altos y/o bosque.

El término háplico hace referencia a que el suelo tiene una expresión típica de ciertos rasgos (típica en el sentido de que no hay una caracterización adicional o significativa). Por otro lado el término lúvico hace referencia a un suelo con un horizonte árgico.

Luvisol

Los Luvisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) que lleva a un horizonte subsuperficial árgico. Los Luvisoles tienen arcillas de alta actividad en todo el horizonte árgico y alta saturación con bases a ciertas profundidades. Su material parental proviene de una amplia variedad de materiales no consolidados incluyendo till glaciario y depósitos eólicos, aluviales y coluviales, desarrollándose principalmente en tierras llanas o suavemente inclinadas en regiones templadas frescas y cálidas con estación seca y húmeda marcadas.

Los luvisoles crómicos son aquellos que aparte de las características ya mencionadas tienen además dentro de 150 cm de la superficie del suelo una capa subsuperficial, de 30 cm o más de espesor, tiene un hue Munsell más rojo que 7.5 YR o que tiene ambos, un hue de 7.5 YR y un croma, húmedo, de más de 4.

Por otro lado los Luvisoles vérticos son aquellos Luvisoles que presentan un horizonte subsuperficial arcilloso (horizonte vértico) que da como resultado procesos de expansión y contracción; presenta superficies pulidas (slickensides) y agregados estructurales en forma de cuña.

Regosoles

Los Regosoles forman un grupo remanente taxonómico que contiene todos los suelos que no pudieron acomodarse en alguno de los otros WRB. En la práctica, los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy profundos ni muy ricos en gravas (Leptosoles), arenosos (Arenosoles) o con materiales flúvicos (Fluvisoles). Los Regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos.

Son suelos débilmente desarrollados en material no consolidado presentes en todas las zonas climáticas sin permafrost y todas las alturas. Los Regosoles son particularmente comunes en áreas áridas (incluyendo el trópico seco) y

en regiones montañosas.

Si el suelo presenta material calcárico (Aplica a material que contiene 2% o más de carbonato de calcio equivalente) y presenta fuerte efervescencia con HCl 1 M en la mayor parte de la tierra fina se le llama Regosol calcárico. Y en un Regosol éutrico la roca continua comienza dentro de 25 cm de la superficie del suelo.

Vertisol.

Los Vertisoles son suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan, lo que ocurre en la mayoría de los años. El material parental de estos suelos son sedimentos que contienen elevada proporción de arcillas expandibles, o arcillas expandibles producidas por neoformación a partir de meteorización de rocas básicas. Se desarrollan en depresiones y áreas llanas a onduladas, principalmente en climas tropicales, subtropicales, semiáridos a subhúmedo y húmedo con una alternancia clara de estación seca y húmeda. La vegetación climax es sabana, pastizal natural y/o bosque.

El adjetivo pélico indica que tiene en los primeros 30 cm del suelo un valor Munsell, húmedo, de 3.5 o menos y un croma, húmedo, de 1.5 o menos (sólo es aplicable en Vertisoles).

4.3. Climatología

La diversidad de los relieves que presenta el estado de Jalisco tiene como consecuencia una variedad de climas; no obstante, esta diversidad climática aparenta tener cierta homogeneidad regional y una marcada estratificación, en función de la distribución de las precipitaciones.

Durante el verano y gran parte del año Jalisco sufre la influencia de las masas de aire provenientes del anticiclón del Atlántico (Anticiclón de las Bermudas) que son las responsables del régimen térmico y de una proporción relativa de las precipitaciones. Estas masas de aire se manifiestan como vientos del este y del sureste. También dejan sentir una marcada influencia de los vientos ciclónicos del Pacífico los cuales penetran en Jalisco como vientos del sur-oeste y son los causantes de la mayoría de las precipitaciones de verano en el estado (Rosier Barrera, 2002).

Durante el invierno influyen en Jalisco las masas de aire provenientes de las altas presiones de la zona templada y polar, provocando las bajas temperaturas y las lluvias frontales. Así mismo se manifiestan excepcionalmente las masas de aire del noroeste provenientes de las depresiones del norte del Pacífico, causante de lluvias frontales y bajas temperaturas. La corriente de altura del Jet Stream⁶ tiene que ver con el comportamiento de estas masas de aire frío del norte.

La orientación de las estructuras geológicas del relieve con respecto a la trayectoria de las masas determina las características de los climas regionales y locales. En Jalisco predominan los climas tropicales, dada la influencia de los vientos alisios y de los vientos ciclónicos y el régimen de precipitaciones de verano.

El oeste y el sur de Jalisco presentan un clima tropical húmedo con más 1000 mm de precipitaciones anuales; el centro tiene un clima tropical semihúmedo con lluvias de 900 a 800 mm anuales y el norte y noreste un clima tropical semiseco con precipitaciones de 700 a 500 mm. La variaciones térmicas guardan estrecha relación con el relieve y la altura sobre el nivel del mar en función de las masas de aire tropical y de la zona templada (Rosier Barrera, 2002).

⁶ Las corrientes en chorro (en inglés Jet stream) son flujos rápidos de aire, corrientes relativamente angostas de aire que se encuentran en la atmósfera a una altura de 11 kilómetros (36.000 pies, variablemente según la latitud) sobre la superficie de la tierra y por debajo de la tropopausa. Estas corrientes se forman en las proximidades de masas de aire adyacentes con diferencias significantes de temperatura, como sucede cuando se reúnen corrientes provenientes de una región polar y el aire más caliente a menores latitudes (Blackburn, y otros, 2007).

Particularmente en el área de estudio y conforme a los registros históricos de las estaciones climatológicas seleccionadas caen anualmente alrededor de 888 mm de lluvia; iniciando la temporada de monzones en el mes de mayo con una lámina promedio de 24 mm y finiquitando en el mes de octubre con láminas de precipitación alrededor de los 55 mm; las precipitaciones medias mensuales más importantes se presentan a partir de junio y terminan en septiembre, siendo el mes con mayor precipitación julio con 240 mm, la lámina promedio anual para todas las estaciones de 230 mm. Los seis meses restantes se mantienen con precipitaciones bajas de alrededor de 10 mm de lluvia, siendo el mes más seco marzo con una lámina promedio de 4 mm.

En lo que respecta a la temperatura; dentro de la zona de estudio la temperatura promedio anual es de 21 °C, siendo los meses más calurosos mayo y junio con una temperatura media mensual de 24 °C, y los meses más fríos diciembre y enero con una temperatura media mensual de 17 °C.

En la figura 4.6 se muestra el climatograma promedio histórico para las estaciones climatológicas seleccionadas dentro del área de estudio.

4.4. Hidrología Superficial

El estado de Jalisco, se encuentra dentro de la región hidrológica administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico, el estado contiene 7 regiones hidrológicas, que a su vez se encuentran subdivididos en 16 sub-regiones hidrológicas y 20 cuencas hidrológicas (figura 4.7); una región hidrológica es definida como un área territorial conformada en función de sus características orográficas e hidrológicas, con el fin de agrupar la información hidrológica y de calidad del agua. Los límites regionales no coinciden con los estatales ni los municipales (Comisión Nacional del Agua, 2008).

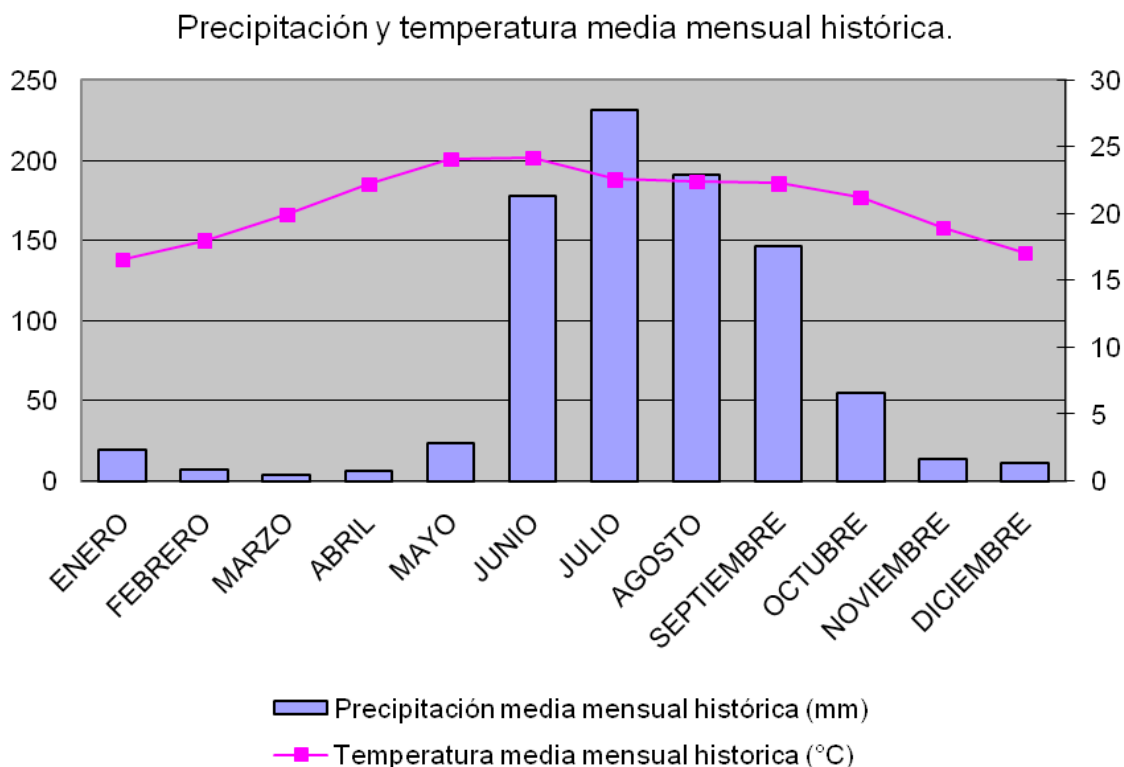


Figura 4.6. Climatograma promedio de las estaciones seleccionadas procesado del año 1980 a 1989



Figura 4.7. Subregiones hidrológicas en Jalisco; fuente: <http://mapserver.inegi.gob.mx> 2010.

La zona de estudio comprende cuatro microcuencas (MC) las cuales se localizan dentro de dos regiones hidrológicas (figura 4.8), la No. 12 “Lerma Santiago”, que en total cubre una superficie de 132,916 Km², en ella caen anualmente 717.7 mm de lluvia y se escurren superficialmente un promedio de 13.842 Mm³ al año, la segunda la No. 14 “Río Ameca” la cual cubre una extensión territorial de 12,255 km², caen anualmente 884.6 mm de lluvia y el escurrimiento natural medio superficial interno es de 2.165 Mm³ al año (Comisión Nacional del Agua, 2008).

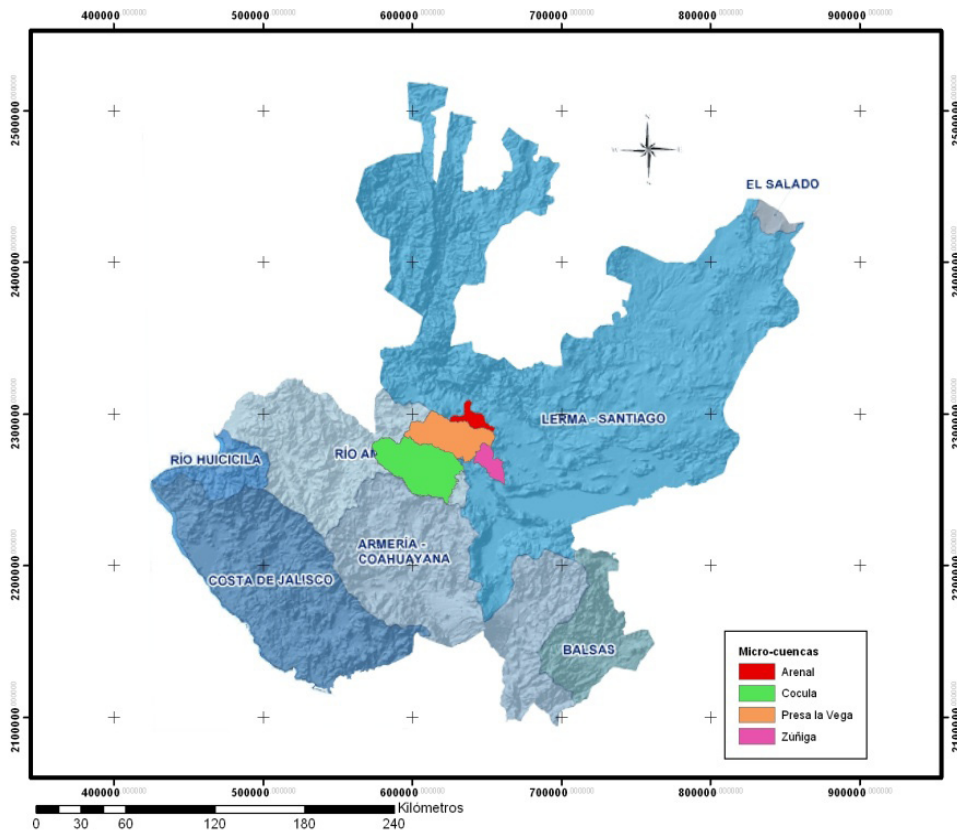


Figura 4.8. Regiones hidrológicas del estado de Jalisco.

La red hidrográfica de la región tiende a ser dendrítica radial de las partes altas hacia los valles, notándose en la Caldera de La Primavera que los materiales son más erosionables y por lo tanto los arroyos tienen una expresión superficial más importante, dentro de las corrientes principales se tienen los arroyos del Cocoliso y Chapulimita que circulan de poniente a oriente y pasan cerca de la población de Ahualulco hasta la presa La Vega.

En el suroeste de la zona de estudio, son tributarios son los arroyos de Cocula y de San Martín que nacen en las estribaciones del norte de la Sierra Quila y cruzan el valle de Ameca hacia el poniente hasta confluir con el río Ameca.

Existen varios manantiales de gastos y características fisicoquímicas diversas en el valle de Tala-Ahualulco por ejemplo, se presentan manantiales termales y fríos, algunos de gran caudal como los de Río Caliente, Tala y Teuchitlán y muchos otros de gasto reducido, pero aproximadamente constante; en el valle de Ameca en cambio no se conocen manantiales importantes, solo se conocen algunos intermitentes (Comisión Nacional del Agua, 2000).

Las características hidrológicas particulares de las MC estudiadas y delimitadas en esta investigación se muestran en la figura 4.9 y tabla 4.3.

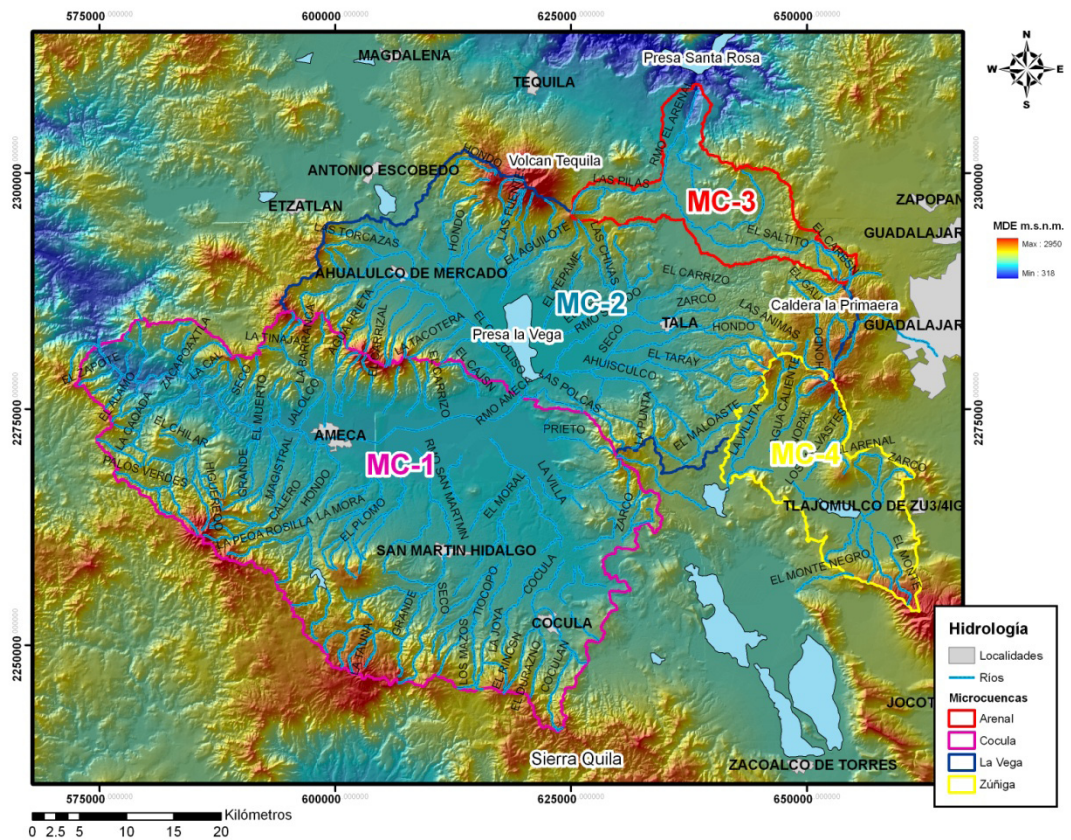


Figura 4.9. Hidrografía de la zona de estudio.

La microcuenca Cocula (MC-1), se encuentra dentro de la región hidrológica Ameca, en la subregión hidrológica Ameca en la parte sur de la cuenca hidrológica La Vega-Cocula, tiene un área de 1,668.49 km² en esta MC nace el río Ameca.

El río Ameca es un río corto de México de la vertiente del océano Pacífico, que discurre por el estado de Jalisco y desemboca en la bahía de Banderas, cerca de Puerto Vallarta. En su tramo final forma la frontera entre los estados de Nayarit y Jalisco. Tiene una longitud de 230 km y drena una cuenca de 12,214 km², Nace en el Bosque de la Primavera, a escasos 23 km al oeste de Guadalajara y discurre en dirección oeste. El río toma su nombre de la ciudad de Ameca (56.681 habitantes), la cual atraviesa. Entre sus afluentes principales están los ríos Ahuacatlán y Amatlán de Cañas (INEGI, 2010).

La microcuenca Presa la Vega (MC-2), tiene una población de 152,639 habitantes y se encuentra en dentro de la región hidrológica Ameca, en la subregión hidrológica Ameca en la parte norte de la cuenca hidrológica La Vega-Cocula. Drena un área de 1,150.70 km². En esta cuenca se origina también la corriente del río Salado, en el nacimiento de varios manantiales termales que acumulan cerca de 400 l/s en forma constante y que a lo largo de su cauce hasta el municipio de Tala recibe otras aportaciones subterráneas, hasta ser la principal alimentación de la presa La Vega.

Esta presa tiene una gran importancia para el régimen hidrológico de la región, pues a ella confluyen las corrientes más importantes de este valle y a la vez, de aquí se origina el río Ameca. Almacena un volumen útil de aproximadamente 42.8 Mm³ y tiene capacidad para desalojar hasta 250 m³/s. El agua superficial es utilizada en la zona de riego del valle de Ameca de aproximadamente 8,000 ha (Comisión Nacional del Agua, 2000).

La microcuenca el Arenal (MC-3), no se encuentra registrada por la CNA. El principal municipio de esta MC es el Arenal dentro de la región hidrológica Lerma-Santiago en la subregión hidrológica Alto Santiago en la parte oeste de la cuenca Santiago-Guadalajara y drena un área de 320 km².

El afluente más importante de esta microcuenca es el arrollo intermitente El Arenal, el cual desemboca en la Presa Santa Rosa misma que tiene una capacidad total de 371.72 Mm³ aunque en el 2009 tuvo un almacenamiento máximo de 394.07 Mm³ y un mínimo de 157.26 Mm³ (Gobierno de Jalisco, 2010).

Por último la microcuenca Zúñiga (MC-4), no se encuentra registrada por la CNA. Nombrada así debido a que el municipio más cercano es Tlajomulco de Zúñiga, se localiza dentro de la región hidrológica Lerma-Santiago, en la subregión hidrológica Bajo Lerma, en la cuenca hidrológica Lago de Chapala. Drena un área de 379.89 km²; no posee cuerpos superficiales de agua perennes, solo algunos arroyos como el arroyo Los Venados y el Zapote que desembocan a un cuerpo de agua intermitente en el centro de la microcuenca.

Tabla 4.3. Características de las microcuencas del área de estudio

Clave	Nombre	Área (km ²)	Río o arroyo principal	Observaciones
MC-1	Cocula	1,668.49	Río Ameca	En esta microcuenca principia el río Ameca
MC-2	Presa la Vega	1,150.70	El Salado	El principal cuerpo de agua superficial es la Presa la Vega
MC-3	El Arenal	320	El Arenal	El arroyo El Arenal desemboca en la Presa Santa Rosa
MC-4	Zuñiga	379.89	Los Venados	No existen cuerpos de agua perennes
	Área total	3,519.08		

4.5. Hidrología Subterránea

El estado de Jalisco posee un total de 15 acuíferos (tabla 4.4), de los cuales se extraen anualmente un aproximado de 1.449 Mm³, lo que corresponde a un 40.8% del agua utilizada por el estado, de esta agua 1.021 Mm³ son utilizados por el sector agropecuario, 0.324 Mm³ se destinan para el abastecimiento público, y 0.104 Mm³ son utilizados por la industria auto abastecida. Esta agua es extraída por un total de 137 pozos; en la siguiente tabla se presenta la disponibilidad de aguas subterráneas para los acuíferos de Jalisco, donde aquellos valores negativos representan una explotación intensa del acuífero.

Tabla 4.2. Disponibilidad de Aguas Subterráneas por Acuífero, en Mm³/año

Acuífero	Recarga Media Anual	Extracción	Disponibilidad de Aguas Subterráneas
Atemajac	147.30	159.70	-1.41
Cajititlan	41.00	29.70	10.78
Poncitlan	33.80	25.90	3.29
Ocotlan	88.60	57.10	12.59
Ciudad Guzman	266.00	105.60	135.08
Lagunas	178.70	62.80	120.20
San Isidro	64.20	26.90	12.86
Huejotitlan	9.60	4.20	5.37
* La Barca	67.00	96.70	-24.94
* Ameca	277.30	110.60	159.43
* Lagos de Moreno	196.00	85.00	116.10
* Tepatitlan	41.10	8.80	30.13
* Autlan	76.00	19.00	54.77
* Encarnacion	63.30	112.60	-34.64
* Puerto Vallarta	86.50	37.20	38.58

Información publicada en el Diario Oficial de la Federación al 13-08-2007; excepto *, con información publicada el 31-01-2003. Fuente: CONAGUA. Subgerencia Regional Lerma Santiago Pacífico.

La mayor parte de las MC del área de estudio particularmente la MC-1 y la MC-2. Sirven como área de infiltración para el acuífero Ameca el cual se localiza en la porción media del estado de Jalisco. En la parte más alta de la cuenca del río Ameca, se presentan una serie de planicies rodeadas de grandes cuerpos volcánicos, como el volcán de Tequila al norte, la sierra La Primavera al oriente, la sierra de Quila al sur y el cerro Grande de Ameca en el centro y poniente. La descripción de las unidades hidroestratigráficas del acuífero Ameca fueron tomadas del documento “Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Ameca” publicado por la CNA en el 2000 y se mencionan a continuación.

Las rocas más importantes para la hidrogeología de esta zona tienen un origen volcánico, como resultado del emplazamiento y desarrollo de eventos volcánicos y tectónicos correspondientes a la FVTM; incluso se presentan materiales originados por procesos sedimentarios que rellenaron las depresiones entre las estructuras volcánicas principales.

Estos materiales de relleno en combinación con las rocas volcánicas permeables, forman los acuíferos más importantes, casi todos explotados desde la antigüedad, a través de numerosos manantiales.

En el valle ubicado entre las poblaciones de Ahualulco y Tala en la microcuenca Presa la Vega, se tiene una clara diferenciación entre las rocas originadas por el volcán de Tequila al norte y la Caldera de la Primavera al oriente. La base de la secuencia no es realmente conocida, pero las rocas alteradas y masivas que afloran cerca de Buenavista y en la cortina de la presa, por tener poca permeabilidad pueden funcionar como basamento relativo del subsuelo.

El volcán de Tequila es un estratovolcán que en sus últimas erupciones arrojó lavas basálticas que fluyeron radialmente durante el Plioceno, siguiendo la topografía existente y rellenando los cauces de ríos antiguos. Junto con las

rocas basálticas se han cortado brechas y escorias de la misma composición que aunado al fracturamiento de las rocas representan muy buena permeabilidad y buenas posibilidades para formar acuíferos.

Por otra parte y desde el oriente del valle, se presentaba vulcanismo de tipo riolítico asociado a la caldera de La Primavera, especialmente los materiales que se han cortado en la porción de Tala, que corresponden a productos piroclásticos del Cuaternario de esa caldera, básicamente consisten en tobas de caída con muy alto contenido de pómez y muy poco consolidadas, que le imprime un carácter de alta permeabilidad.

Ambos tipos de materiales, se mezclan y se profundizan en los alrededores de la presa La Vega, sitio en el cual no se tienen pozos profundos por lo que no se conoce cuál es la relación hidrogeológica entre ambos tipos de materiales.

Los materiales más recientes en este valle presentan una graduación lateral de arcillas y arenas en Ahualulco, pasando por arcillas y limos cerca de la presa La Vega, hasta llegar a las arenas cerca de Tala. Estos materiales tienden a engrosarse hacia la presa y a variar también con la profundidad, hecho que se refleja también en diferencias en porosidad y permeabilidad, esta última incluso varía de un extremo a otro del valle en varios órdenes de magnitud.

Por otra parte en el valle de Ameca en la microcuenca Cocula, las rocas del subsuelo presentan mayor regularidad, y de más antigua a reciente se tienen las siguientes unidades: rocas antiguas de composición riolítica de la sierra de Quila al sur del valle con muy poca permeabilidad; hacia el centro se intercalan con las rocas de composición basáltico-andesítica en porciones de estructura lajeada, de edad Mioceno Superior - Plioceno Inferior.

Estas rocas básicas tienen un intenso fracturamiento, sobre todo al oriente de este valle en las proximidades de los pueblos de Agua Caliente y Los Camichines, lo cual les confiere alta permeabilidad secundaria; sin embargo también se ha reportado una alteración de la roca original, lo cual significa una reducción de esa permeabilidad. La productividad de los pozos que extraen agua de estas rocas llega a ser muy buena, y el agua presenta en general buena calidad.

Sobreyace a estas rocas volcánicas, un paquete de materiales de relleno lacustres y aluviales, con espesores variables, de menos de 10 metros en las zonas de pie de monte, hasta profundizarse hacia el centro y poniente de este valle, llegando a cortarse 300 m alrededor del poblado de Ameca.

La heterogeneidad de estos materiales no consolidados se aprecia en los cortes geológicos de los pozos de este valle, con granulometrías que van desde gravas o arenas gruesas hasta arcillas y limos, en matrices de gran variabilidad también. Por esta razón, sus propiedades hidrogeológicas varían también de acuerdo a su compactación y granulometría. En la figura 4.10 se muestran unas secciones esquemáticas del acuífero Ameca.

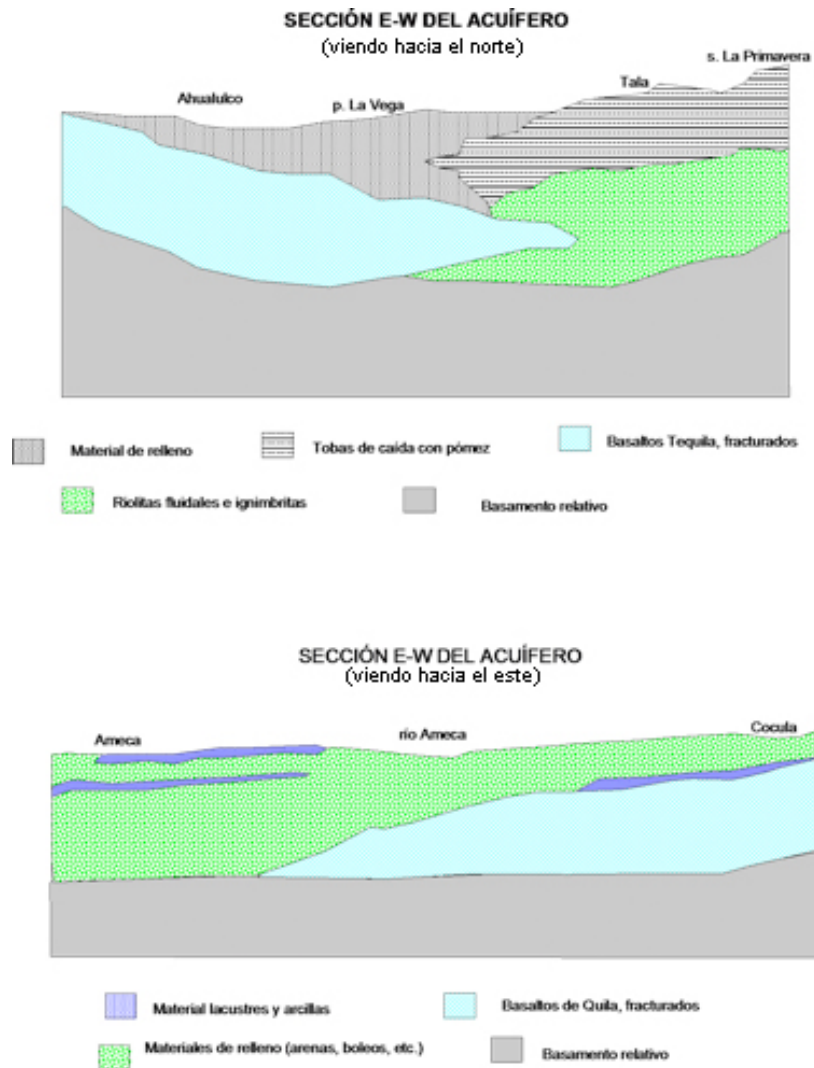


Figura 4.10. Secciones del acuífero Ameca. Fuente: CNA 2000

La mayor parte de los pozos corta a estos materiales granulares y sus rendimientos en consecuencia no son tan altos como en el caso de los basaltos antes descritos, sin embargo se llegan a tener caudales del orden de 30 l/s con abatimientos poco significativos.

La disponibilidad de aguas subterráneas conforme a la metodología indicada en la NOM-011-CNA-2000 referida, se obtiene de restar al volumen de recarga total media anual, el valor de la descarga natural comprometida y el volumen de agua subterránea concesionado e inscrito en el REPDA:

$$159,435,312 = 277,300,000 - 20,884,000 - 96,980,688$$

Donde:

La recarga total media anual, corresponde con la suma de todos volúmenes que ingresan al acuífero, en forma de recarga natural más la recarga inducida, que para el acuífero Ameca es de 277.3 Mm³/año.

Por lo tanto existe un volumen disponible de 159.43 Mm³ anuales para nuevas concesiones en la unidad hidrogeológica denominada acuífero Ameca, en el Estado de Jalisco.

5. RESULTADOS

Los parámetros del balance hidrológico en las microcuencas estudiadas se estimaron implementando la metodología propuesta en el capítulo 2 para la serie de años 1980-1989.

5.1. Variación espacio-temporal de la precipitación

La figura 5.1 muestra los mapas de isoyetas para la serie de años seleccionada. Cabe recordar que estos mapas se desarrollaron en un SIG (ArcInfo 9.2), donde a partir de datos puntuales de precipitación mensual de estaciones climatológicas y mediante un método geoestadístico de interpolación (método de kriging) fue posible determinar la distribución espacial de la precipitación anual de las microcuencas en estudio.

5.2. Variación espacio-temporal de la evapotranspiración

La figura 5.2 presenta los mapas de isoevapotranspiración para la serie de años seleccionada. La evapotranspiración se calculó mediante la ecuación de Turc, que toma en cuenta la precipitación anual y la temperatura media mensual (obtenidas de las estaciones climatológicas) y al igual que en el caso anterior los mapas de isoevapotranspiración se desarrollaron en un SIG (ArcInfo 9.2) y mediante un método geoestadístico de interpolación (método de kriging) se determinó la variación espacial de las microcuencas.

5.3. Análisis edáfico

El análisis edáfico consistió en un muestreo representativo de los suelos presentes en la zona de estudio para su posterior análisis en laboratorio con el fin de determinar algunas de sus propiedades hidráulicas y clasificarlos según lo estipulado en la NOM-011.

5.3.1. Trabajo de Campo

A continuación se describen brevemente los perfiles de suelo estudiados en cada punto de verificación edafológico (PVE) y sus respectivos horizontes.

PVE1: es un suelo cubierto por un depósito aluvial más reciente, se pueden apreciar dos horizontes. El horizonte A se trata de un horizonte húmico con un espesor de 40 cm, de color gris, consistencia arenosa con presencia de raíces; el horizonte B se trata de un horizonte de lixiviación con un espesor de 50 cm, color café y una consistencia arcillosa y húmeda. Este suelo se encuentra clasificado como un Luvisol Vértico.

PVE2: es un suelo de color rojo de textura arcillosa que al igual que en el caso anterior es posible observar dos horizontes. El primero es un horizonte húmico (A) de 40 cm de espesor con mucha materia orgánica y una separación degradada a un horizonte B mal clasificado de más de 70 cm de espesor. Es un suelo clasificado como Phaeozem Lúvico.

PVE3: se trata de un suelo de un color gris oscuro de poco espesor (20cm), de estructura prismática y alta cantidad de materia orgánica, es un suelo arcilloso con altísimo contenido de materia orgánica y arcillas expandibles clasificado como un Vertisol Pélico.

PVE4: en este perfil se pueden apreciar dos horizontes. El primero, un horizonte A presenta gran cantidad de raíces provenientes de la plantación de maguey que se encuentra encima de él. El horizonte presenta una selección moderada, granos de cuarzo y líticos de 2 (mm) en una matriz arcillosa. Las partículas poseen una esfericidad de 0.5 y una redondez de 0.3 y un tamaño de partícula de arena media a gruesa. El horizonte B presenta un color mas amarillento y mejor selección, posee granos de cuarzo y líticos con un tamaño que va de 0.1 (mm) – 0.5 (mm), y una esfericidad y redondez de 0.5 y 0.7 respectivamente, todo en una matriz arcillosa que le da consistencia al suelo. Se encuentra clasificado como un Phaeozem Háptico.

PVE5: se trata de un suelo poco desarrollado y de escaso espesor (10-15 cm), con poco crecimiento radicular. El material parental de este suelo es una toba pumítica con alto contenido de arcillas. Se clasifica como un Regosol Éutrico.

5.3.2. Trabajo de laboratorio

Para determinar algunas de las propiedades hidráulicas de los suelos presentes en el área de estudio se realizaron estudios de laboratorios los cuales consistieron en: curvas de humedad, densidad real, densidad aparente y porosidad. En la tabla 5.1 se presenta un resumen con los resultados obtenidos para cada horizonte de los suelos analizados en laboratorio.

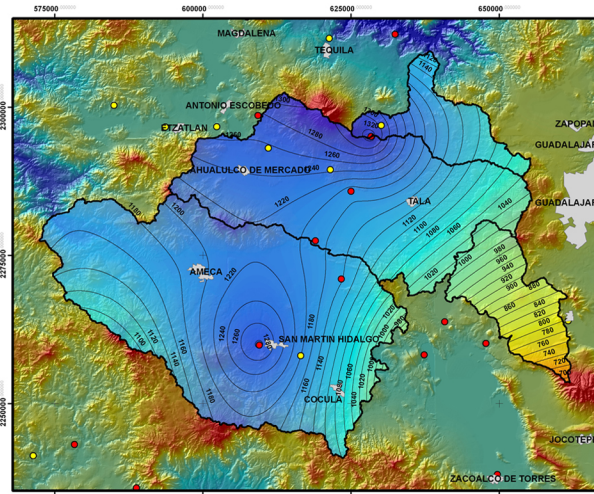
Tabla 5.1. Resultados promedios para cada horizonte de los suelos analizados en laboratorio.

PVE	Suelo	Horizonte	Capacidad de Campo %	Punto de Marchitez %	Densidad real (gr/cm ³)	Densidad Aparente (gr/cm ³)	Porosidad %	Clasificación NOM-011
PVE1	Luvisols Vértico	A	20.89	6.43	2.44	1.47	39.78	C
		B	16.06	6.36	2.23	1.45	34.87	
PVE2	Phaeozem Lúvico	A	21.21	10.23	2.53	1.46	42.18	B
		B	30.78	22.07	2.74	1.41	48.31	
PVE3	Vertisol Pélico	A	35.68	25.59	2.44	1.44	41.19	C
PVE4	Phaeozem Háptico	A	17.17	9.18	2.32	1.39	41.27	B
		B	19.86	12.85	2.74	1.56	42.85	
PVE5	Regosol Éutrico	A	55.74	34.77	2.27	1.40	38.47	A

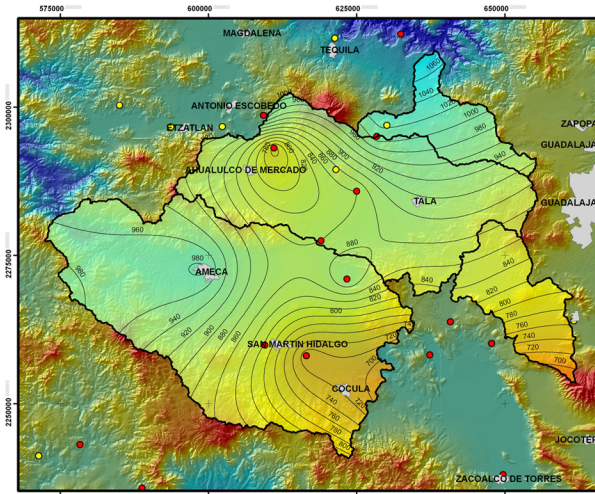
5.4. Clasificación de los suelos según la NOM-011

La figura 5.3 muestra la distribución de los suelos de la zona de estudio conforme a lo establecido por la NOM-011 en permeables (tipo A), medianamente permeables (tipo B) y suelos casi impermeables (tipo C).

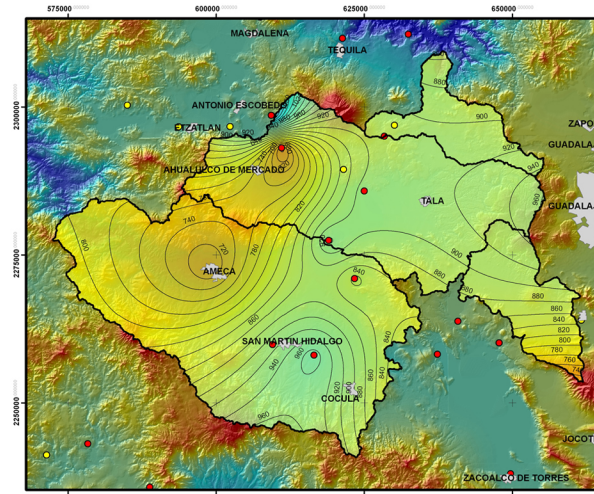
FIGURA 5.1 MAPAS DE ISOYETAS



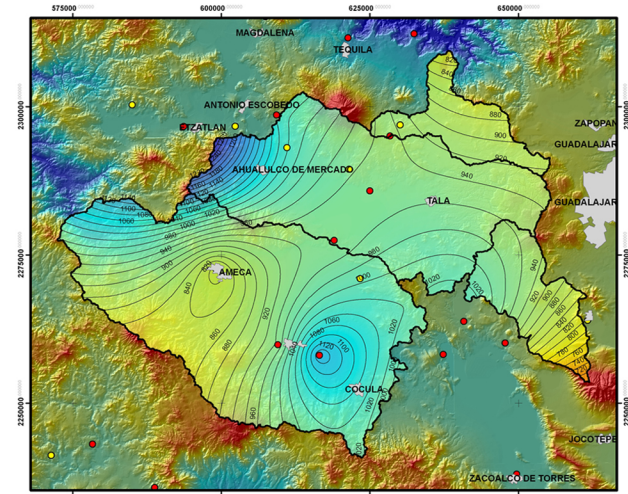
1980



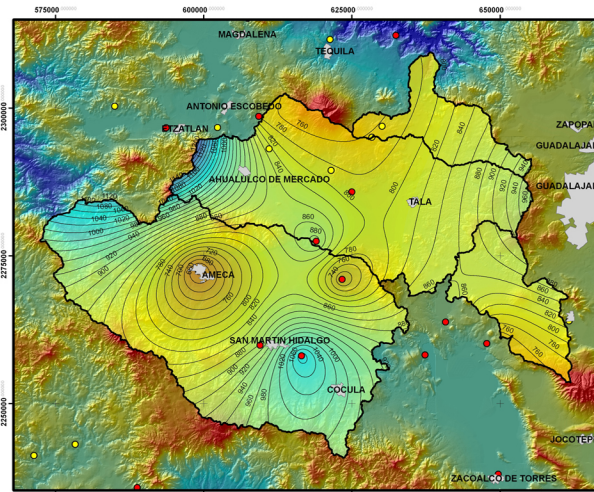
1981



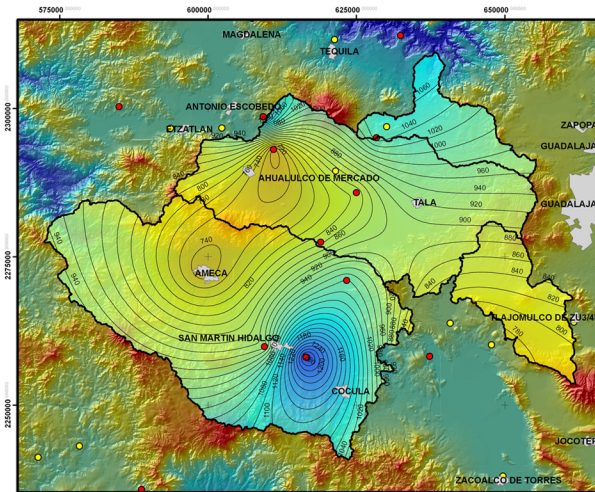
1982



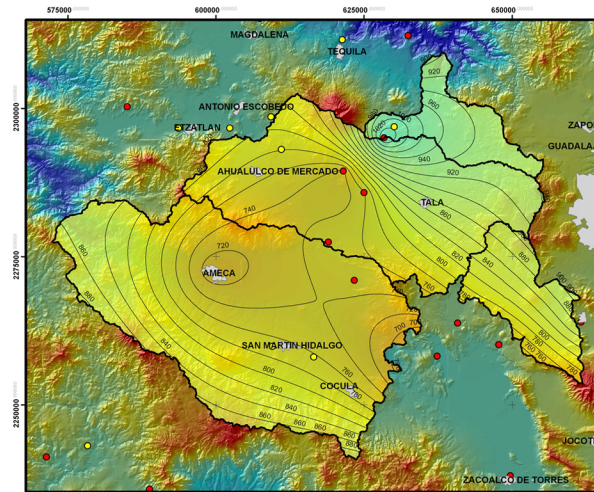
1983



1984



1985



1986

Simbología

- Estaciones climatológicas
- Estaciones climatológicas usadas
- Localidades
- Micro-cuencas
- Isoyetas

Lámina de precipitación (mm)

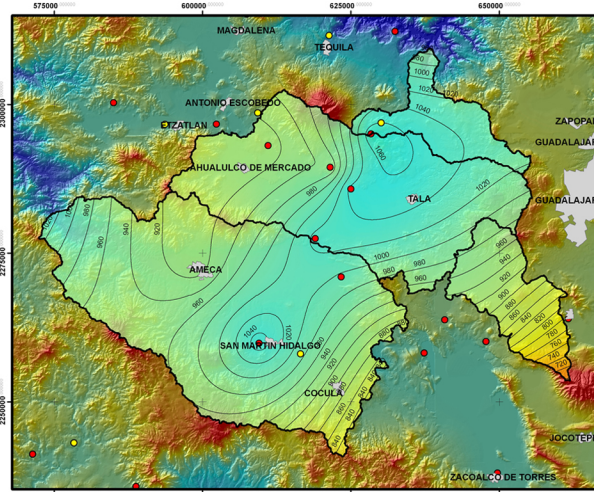
Max : 1340

Min : 540

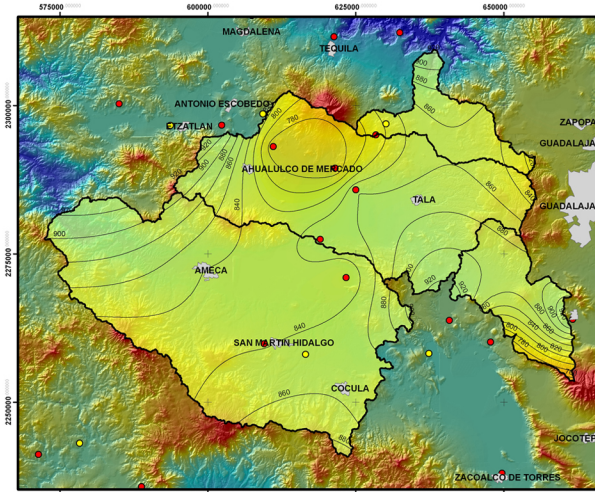
MDE (msnm)

Max : 2950

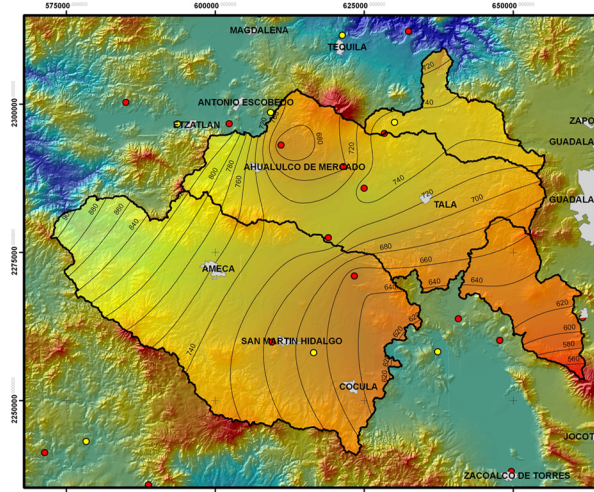
Min : 318



1987



1988



1989

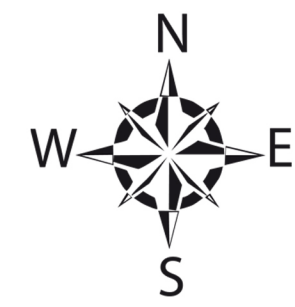
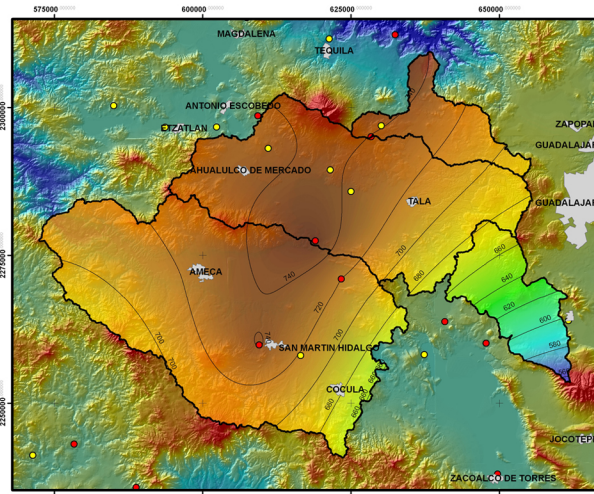
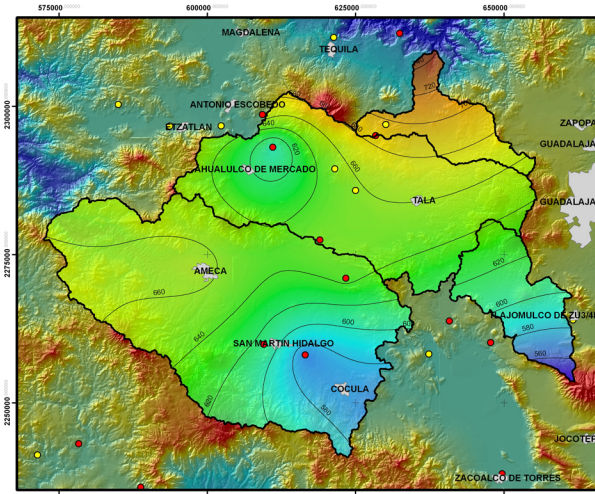


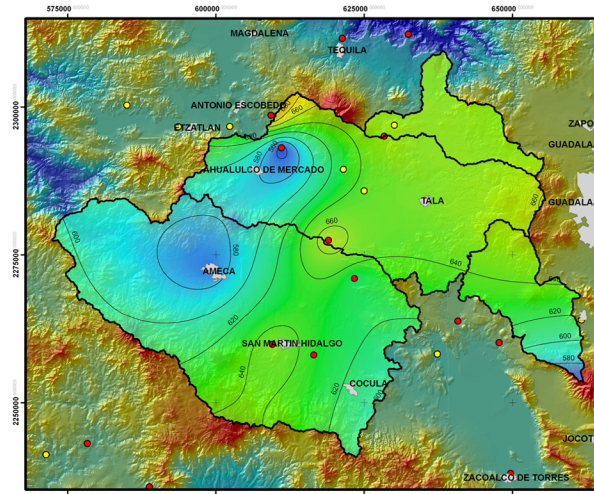
FIGURA 5.2 MAPAS DE ISOEVAPOTRANSPIRACIÓN



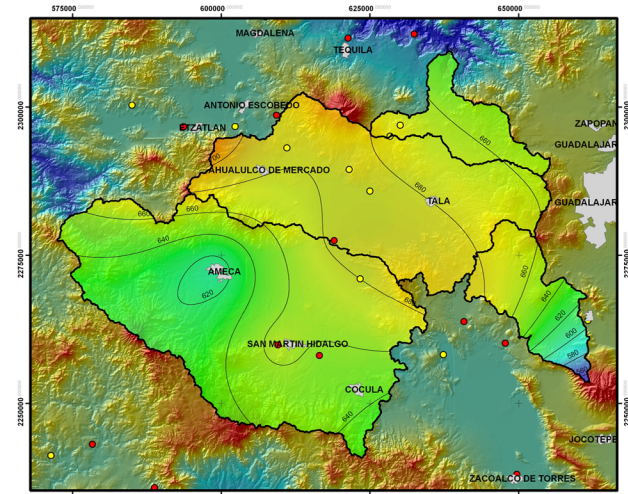
1980



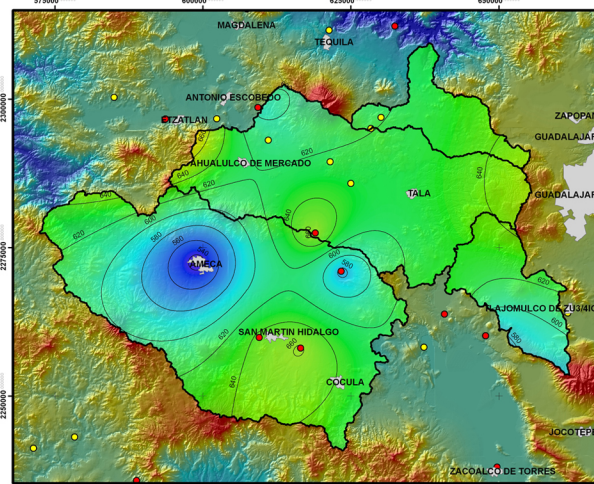
1981



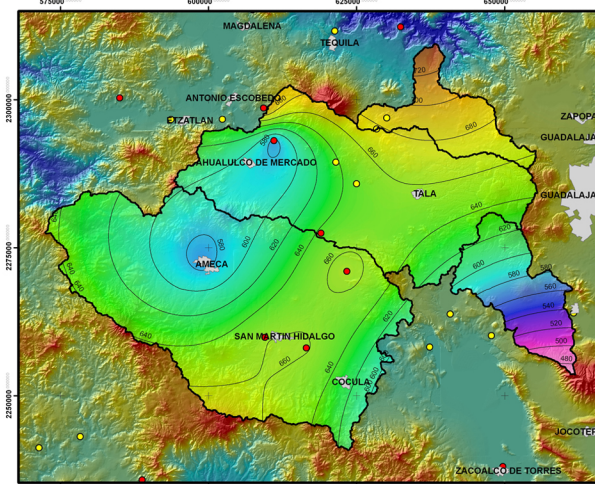
1982



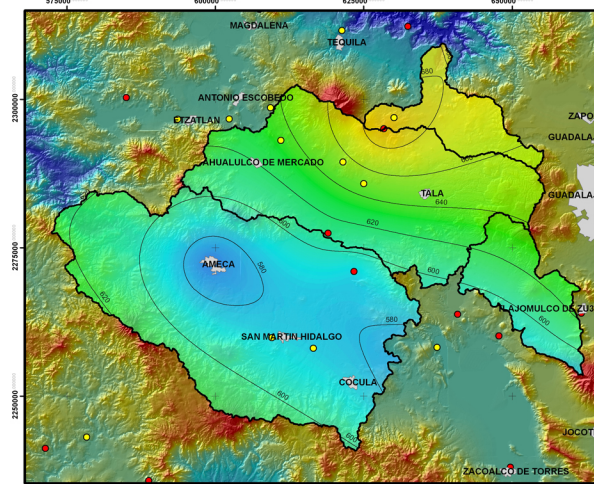
1983



1984



1985



1986

Simbología

- Estaciones climatológicas
- Estaciones climatológicas usadas
- Localidades
- Micro-cuencas
- Isoevapotranspiración

Lámina de evapotranspiración (mm)

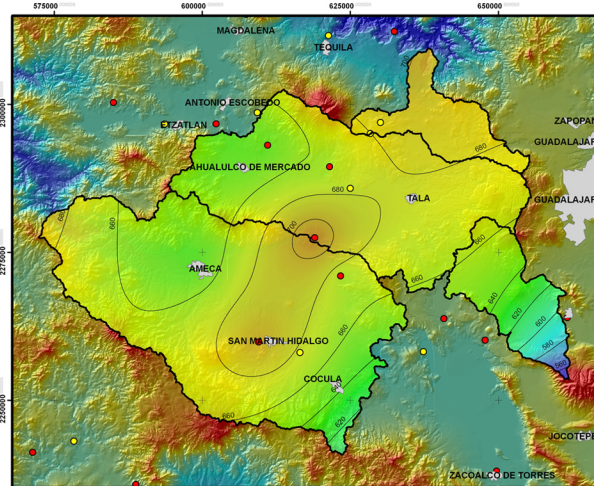
Max : 760

Min : 460

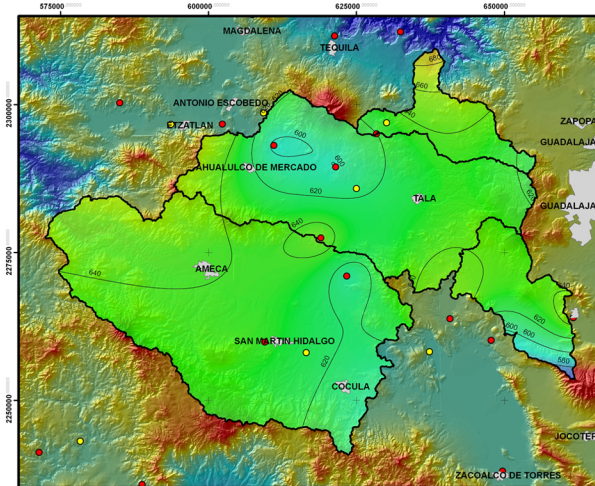
MDE (msnm)

Max : 2950

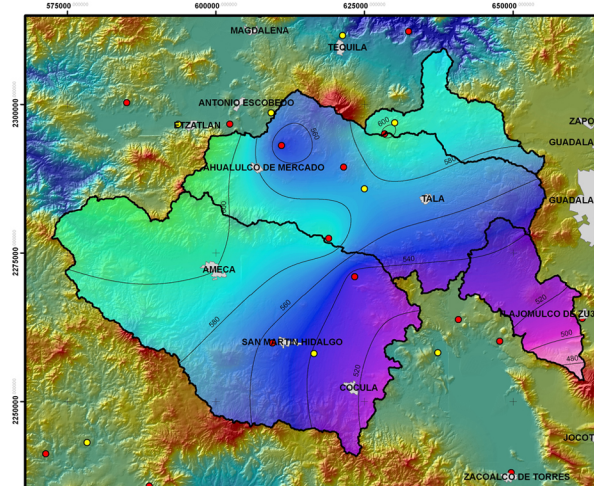
Min : 318



1987



1988



1989



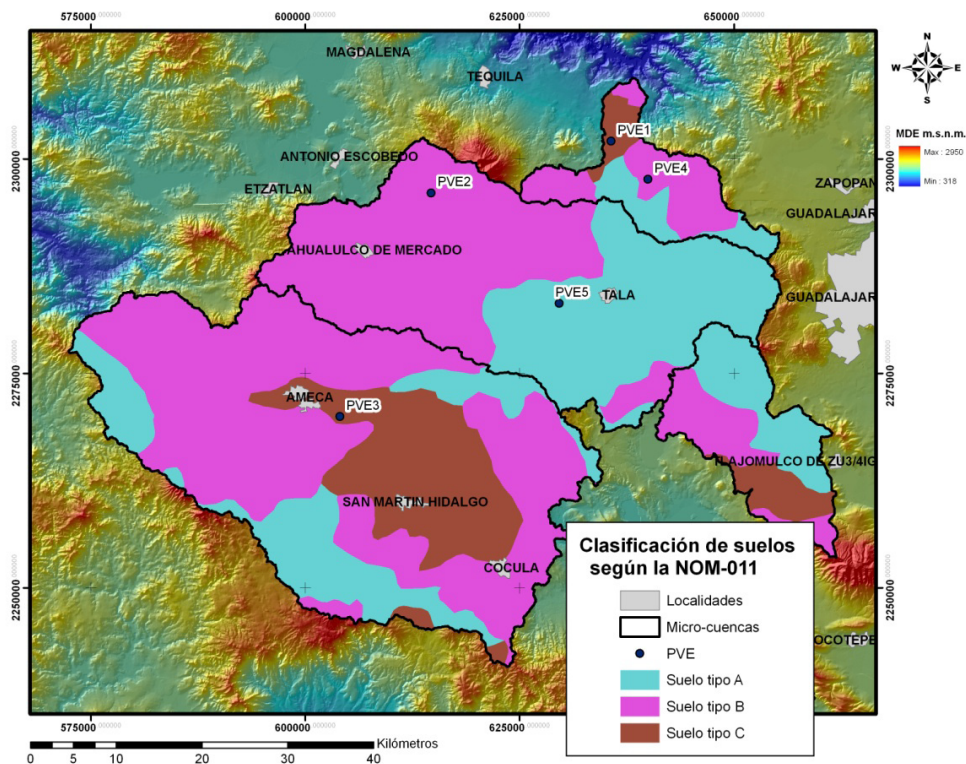


Figura 5.3. Tipos de suelos según la NOM-011.

5.5. Cálculo del parámetro K

El parámetro K se calculó como un promedio ponderado las diferentes áreas con sus respectivas K's (tabla 5.2). Para establecer las diferentes áreas se implementó la herramienta "Intersection" del software ArcInfo 9.2 la cual sobrepone los mapas digitales de uso de suelo (figura 5.4) y tipo de suelo (figura 5.3) en formato vectorial, obteniendo subconjuntos a los cuales se les asignó un valor de K mediante un análisis en el SIG (figura 5.5).

5.6. Mapas de coeficiente de isoescurrencimiento y lámina de escurrimento

Una vez obtenido el valor de la K ponderada, se calcularon los mapas de coeficiente de isoescurrencimiento anual (figura 5.6) para la serie de años seleccionada programando la ecuación 3.7 (que está en función de la precipitación y de K) en la herramienta raster calculator del software ArcInfo 9.2. Mediante esa misma herramienta pero ahora programando la ecuación 3.10 se obtuvieron los mapas de lámina de escurrimento anuales (figura 5.7).

5.7. Variación espacio temporal de la RVP

Finalmente los mapas de lámina de RVP anual (figura 5.8) se obtuvieron nuevamente mediante un álgebra de mapas, programando en la herramienta "raster calculator" del software ArcInfo 9.2 la ecuación 1.2 y mediante la misma herramienta se obtuvieron mapas de coeficiente de RVP (figura 5.9) con la finalidad de facilitar el análisis de la variación espacial de dicho parámetro.

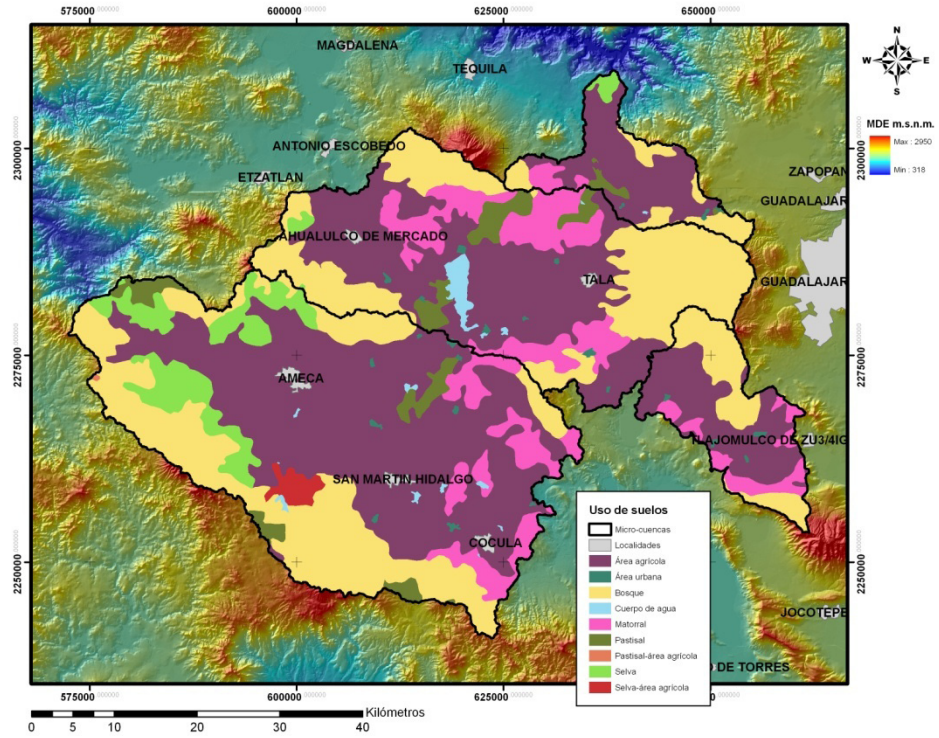


Figura 5.4. Uso de suelos.

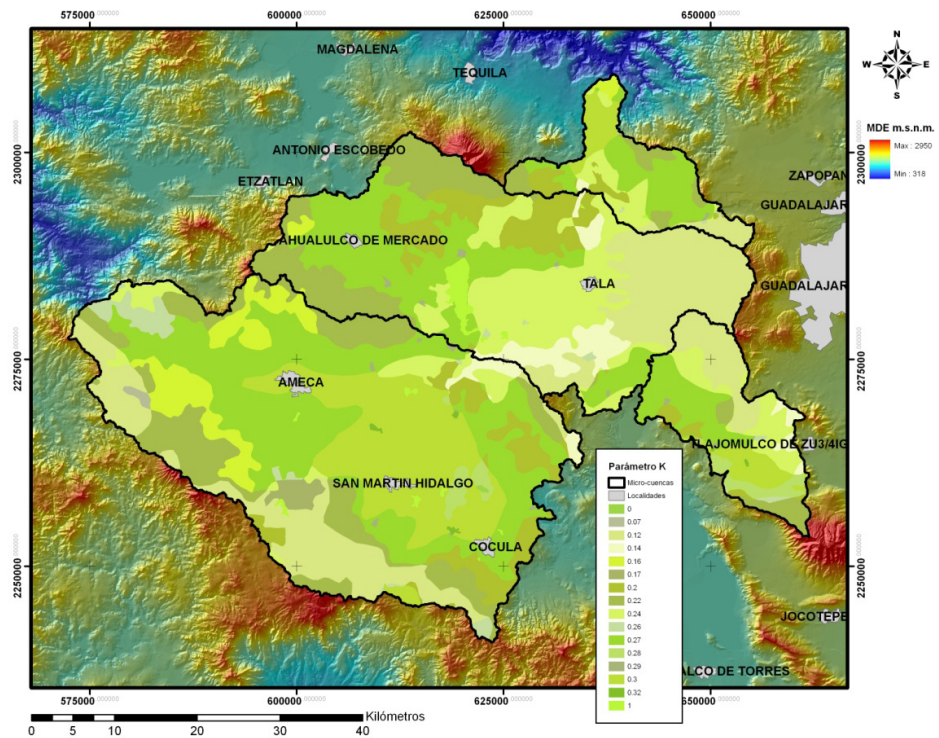
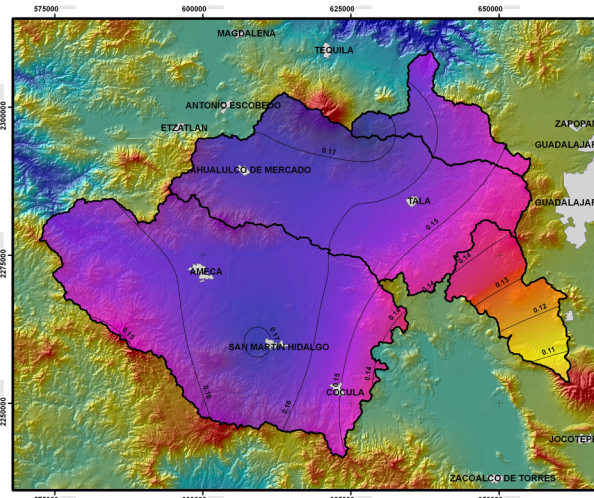


Figura 5.5. Mapa de distribución del parámetro K

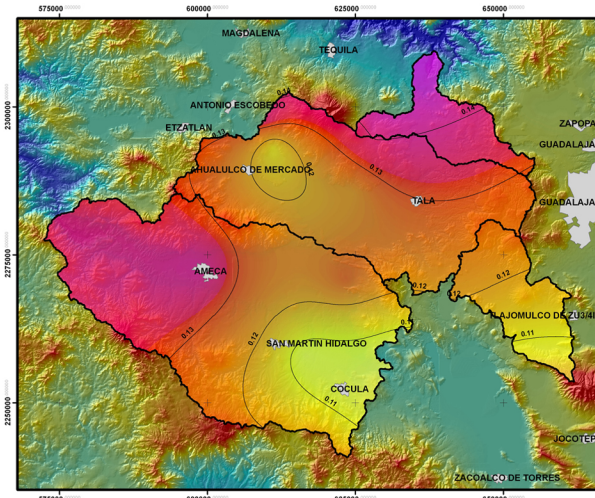
Tabla 5.2. Parámetro K ponderado.

Uso del suelo	Tipo de suelo	Área (km2)	Área %	Factor de ponderación	K pesada
Agrícola	A	297.2547	8.4469	0.24	0.0203
	B	845.3884	24.0228	0.27	0.0649
	C	343.6251	9.7645	0.3	0.0293
Bosque cubierto del 50 al 57%	A	492.3104	13.9896	0.12	0.0168
	B	432.5075	12.2902	0.22	0.0270
	C	8.2083	0.2332	0.26	0.0006
Selva-Área agrícola	A	17.8361	0.5068	0.17	0.0009
	B	29.6024	0.8412	0.26	0.0022
	C	0.0000	0.0000	0.28	0.0000
Matorral	A	90.8765	2.5824	0.14	0.0036
	B	210.9877	5.9955	0.2	0.0120
	C	39.0504	1.1097	0.28	0.0031
Pastizal cubierto del 50-75%	A	453.3876	12.8836	0.2	0.0258
	B	57.6178	1.6373	0.24	0.0039
	C	19.5701	0.5561	0.3	0.0017
Selva	A	4.1694	0.1185	0.07	0.0001
	B	121.5569	3.4542	0.16	0.0055
	C	2.5937	0.0737	0.24	0.0002
Urbana	A	6.8002	0.1932	0.26	0.0005
	B	9.4871	0.2696	0.29	0.0008
	C	11.2814	0.3206	0.32	0.0010
Pastizal-área agrícola	A	0.6379	0.0181	0.22	0.0000
Cuerpo de agua		24.3629	0.6923	1	0.0069
	Área Total	3519.112	100.000	K ponderada	0.22705

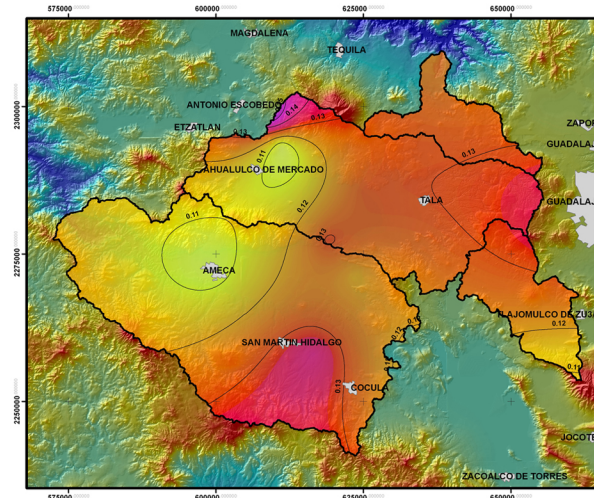
FIGURA 5.6 MAPAS DE COEFICIENTE DE ISOESCURRIMIENTO



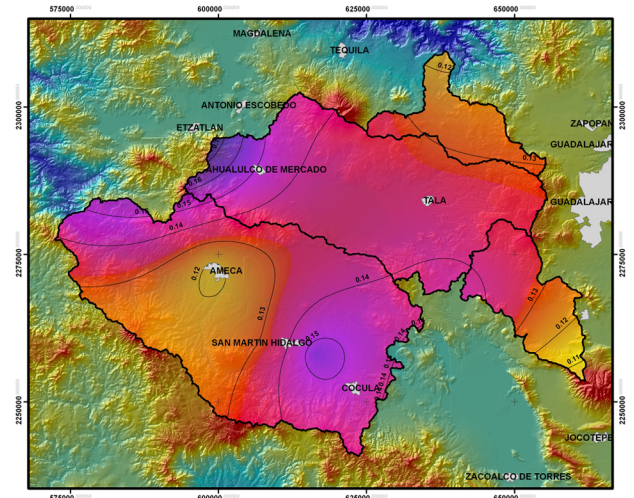
1980



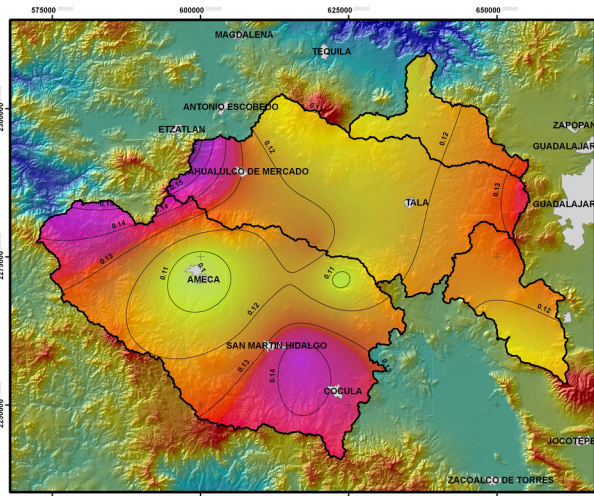
1981



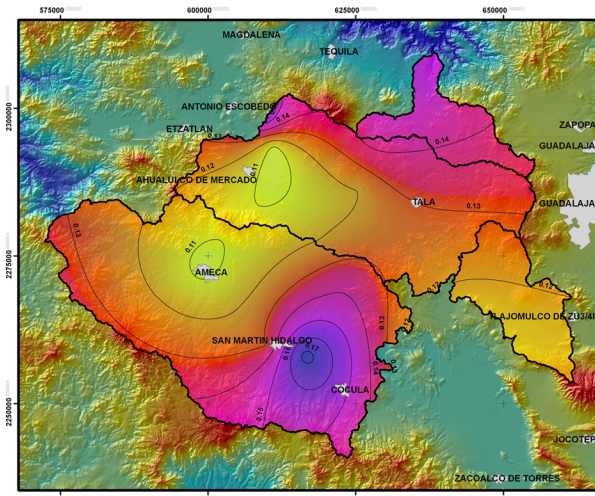
1982



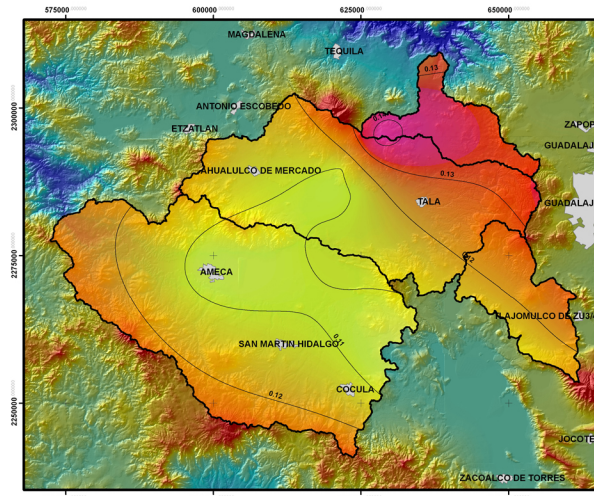
1983



1984



1985



1986

Simbología

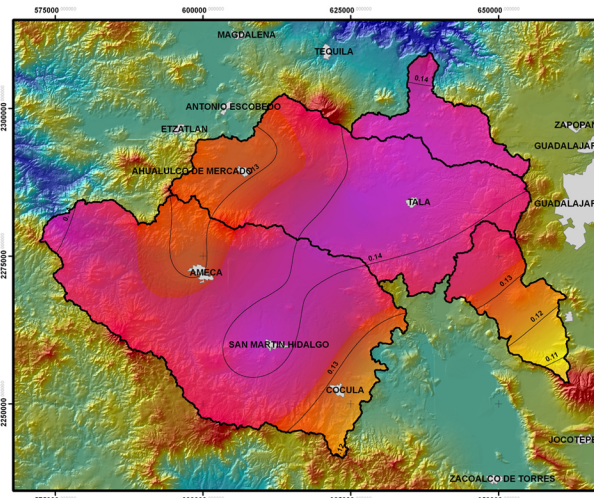
- Micro-cuencas
- Localidades
- Isocoeficiente de escurrimiento

Coefficiente de escurrimiento

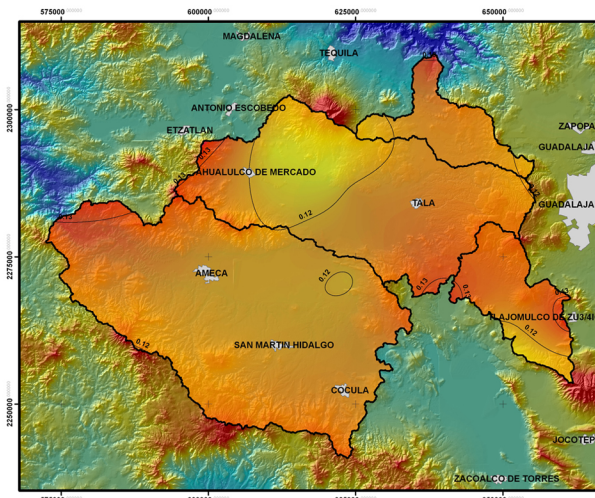
Max : 0.17
Min : 0.08

MDE (msnm)

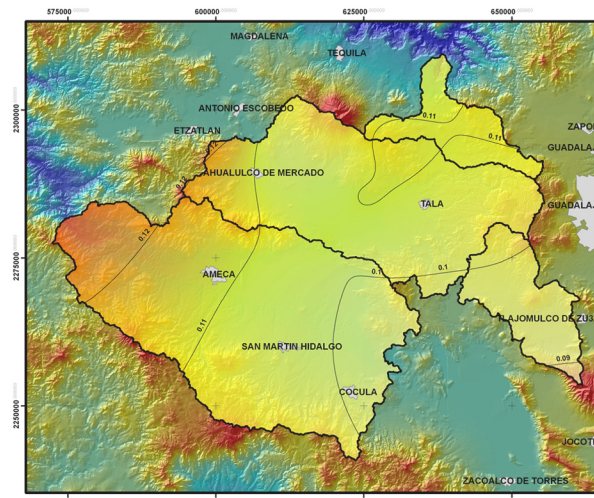
Max : 2950
Min : 318



1987



1988



1989

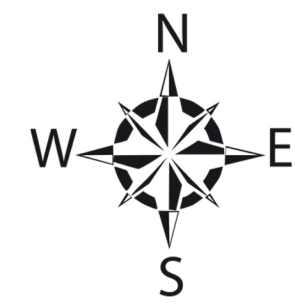
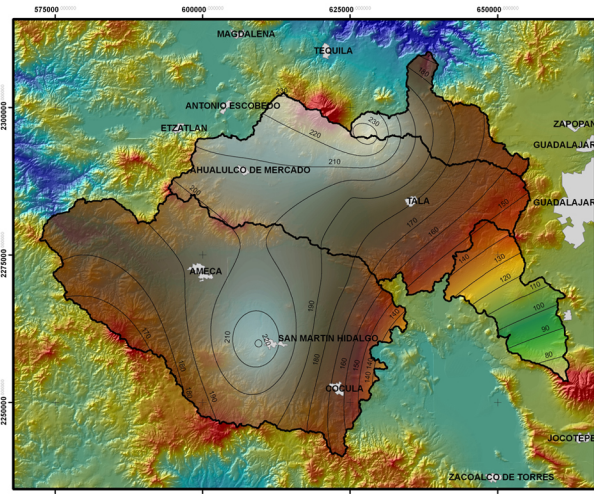
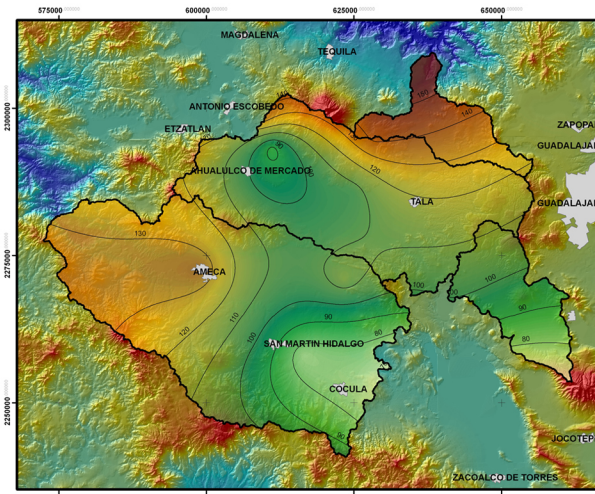


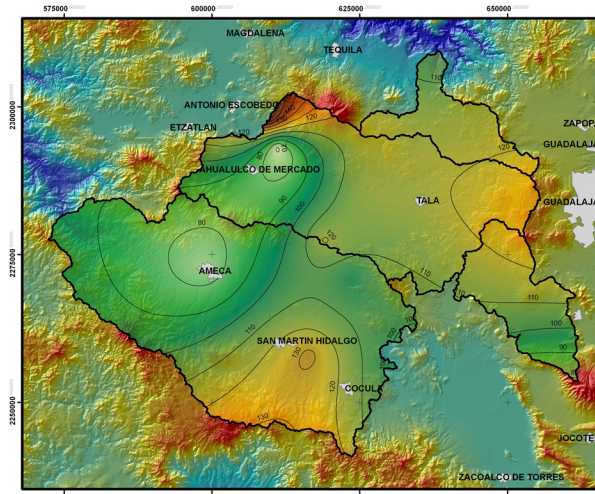
FIGURA 5.7 MAPAS DE LÁMINA DE ESCURRIMIENTO



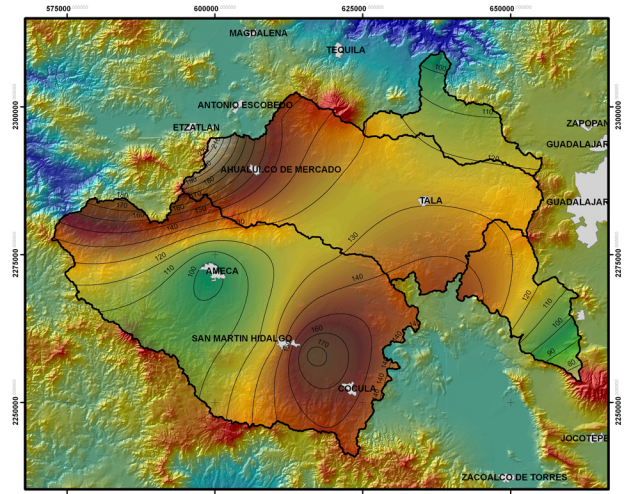
1980



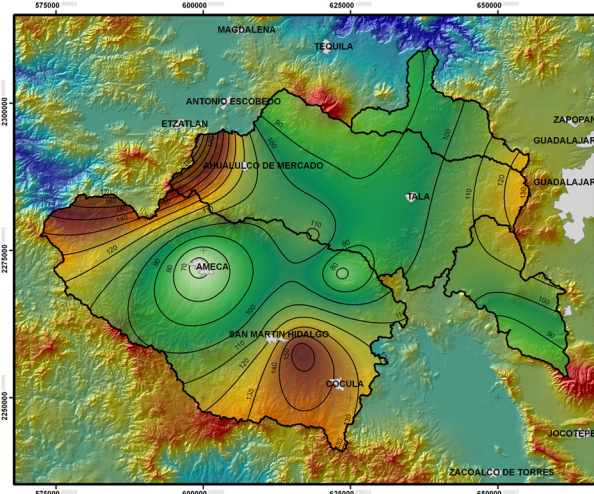
1981



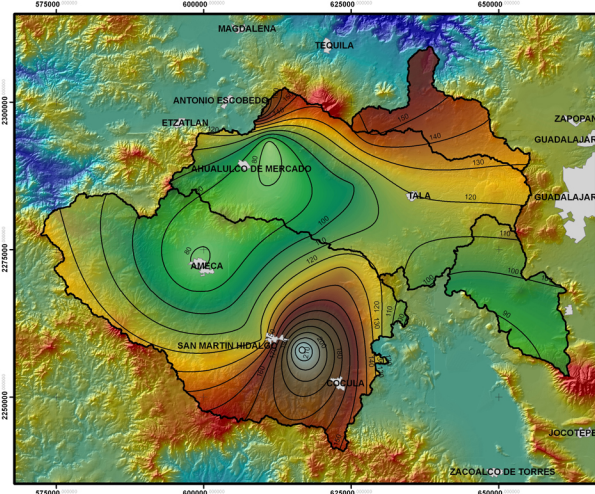
1982



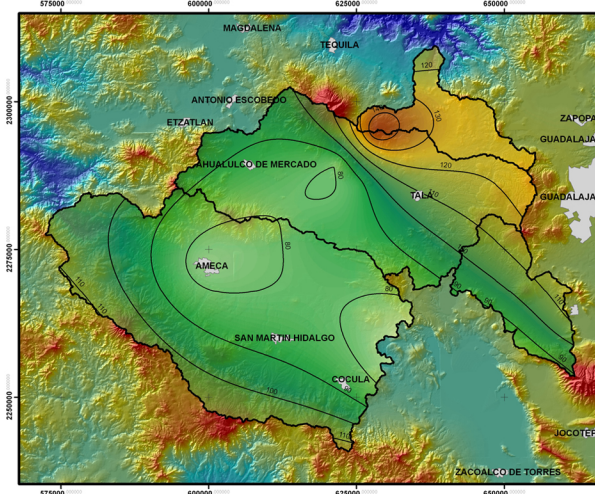
1983



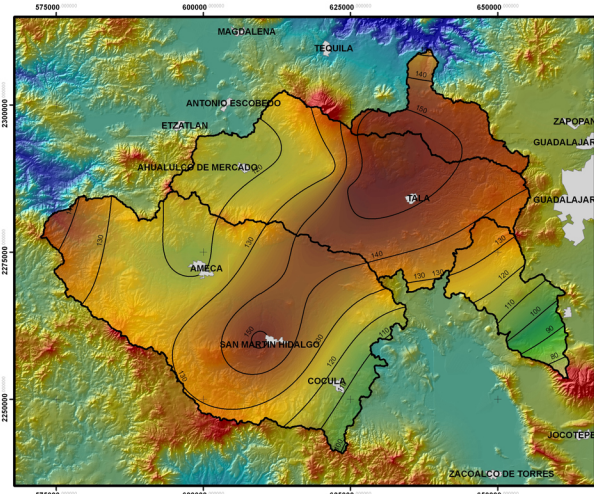
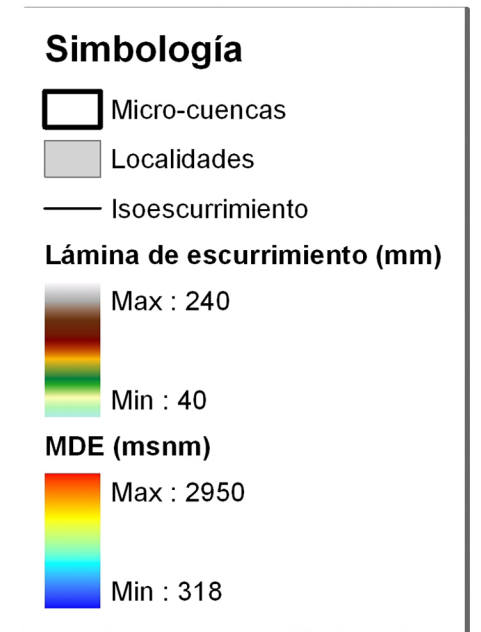
1984



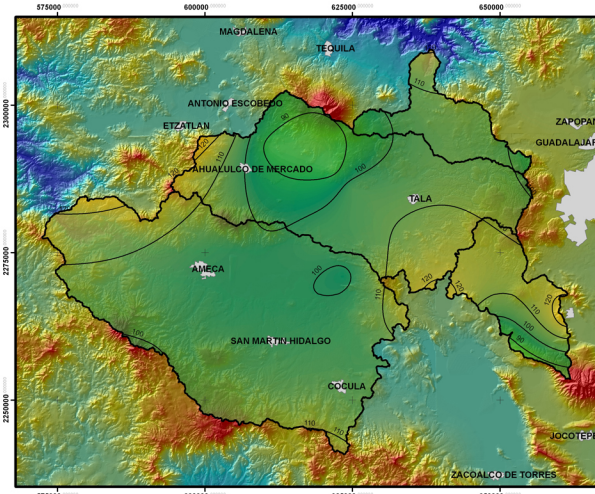
1985



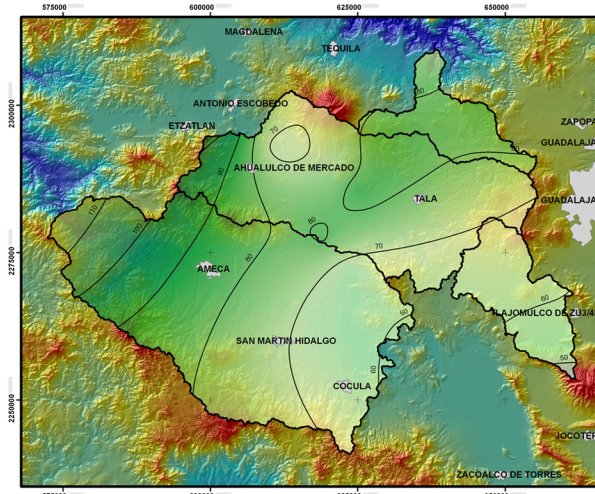
1986



1987



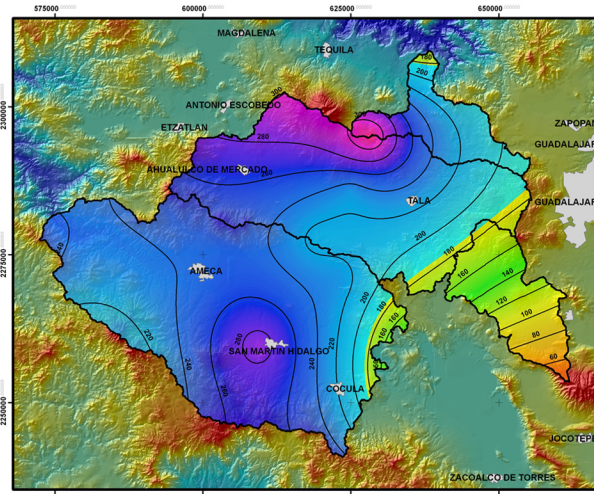
1988



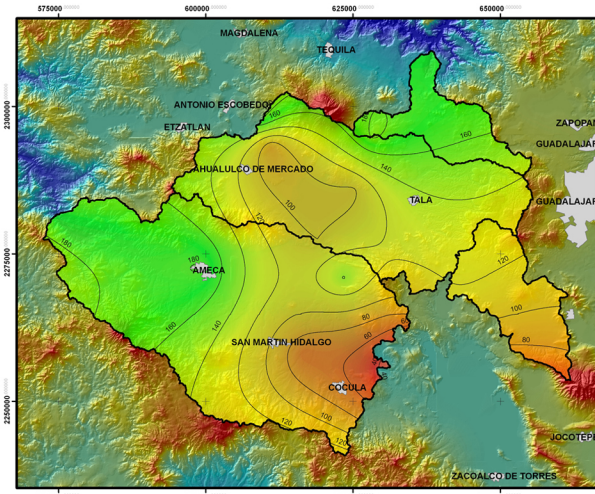
1989



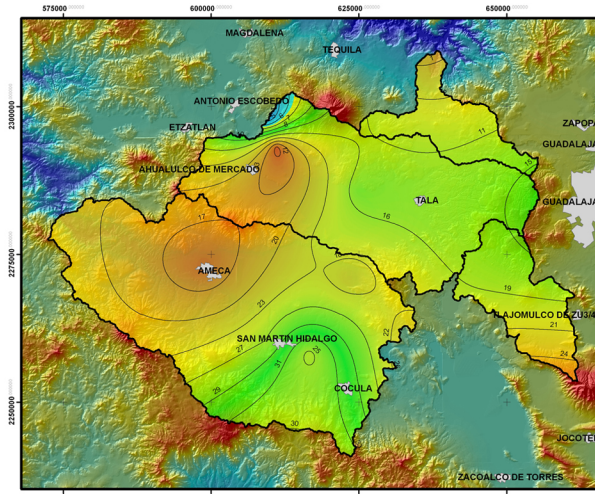
FIGURA 5.8 MAPAS DE LÁMINA RVP



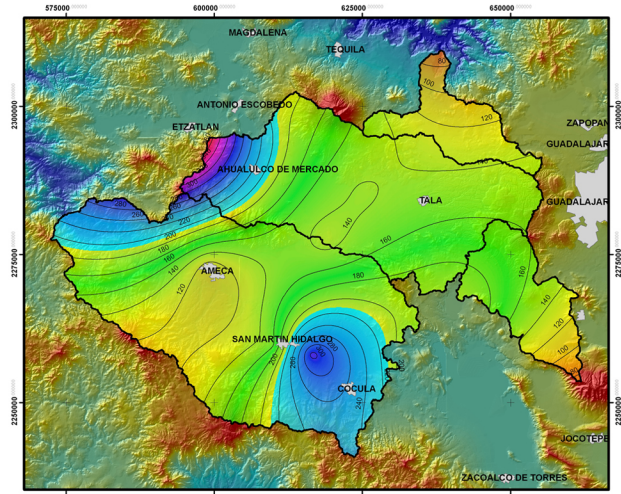
1980



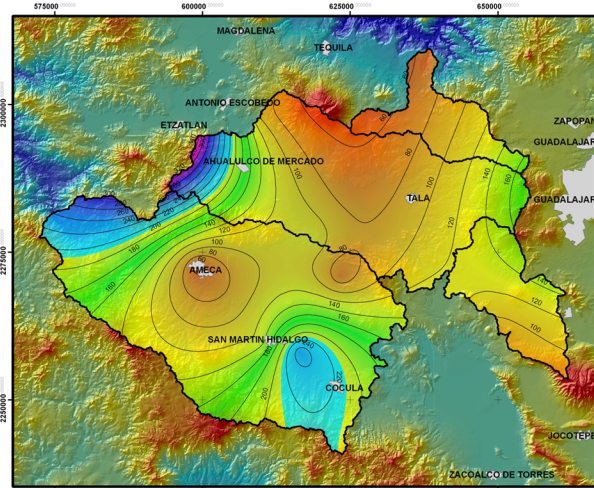
1981



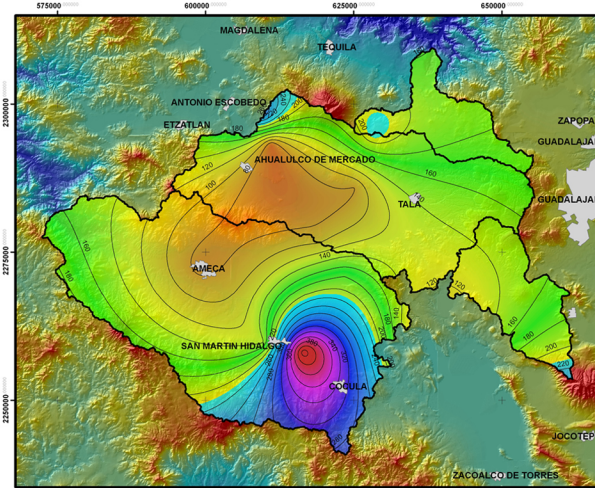
1982



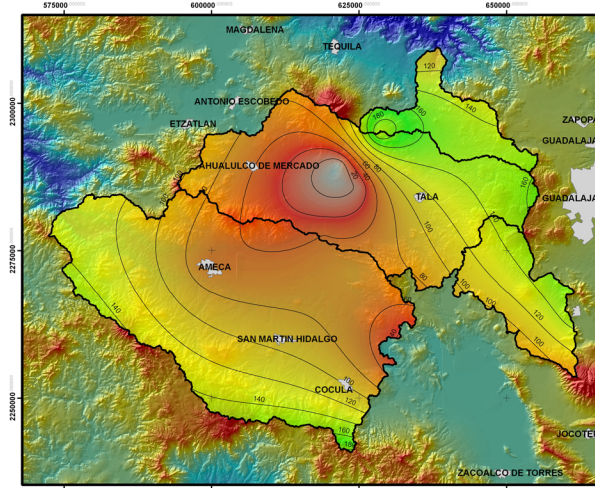
1983



1984



1985



1986

Simbología

- Micro-cuencas
- Localidades
- Isoinfiltración

Lámina de infiltración (mm)

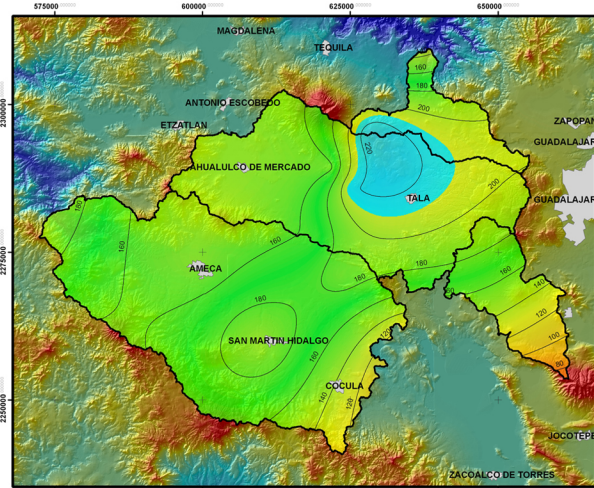
Max : 380

Min : 1

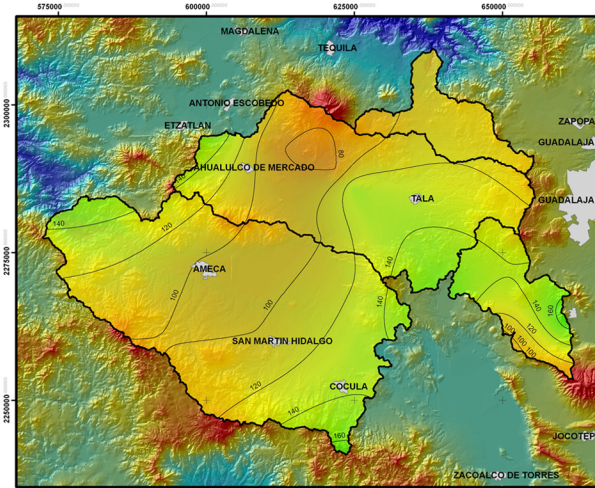
MDE (msnm)

Max : 2950

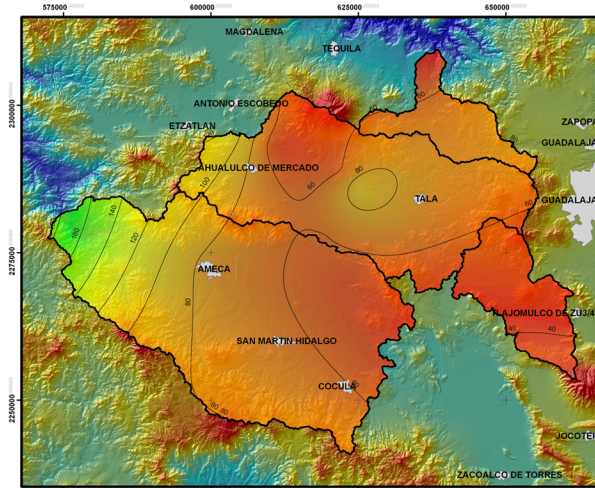
Min : 318



1987



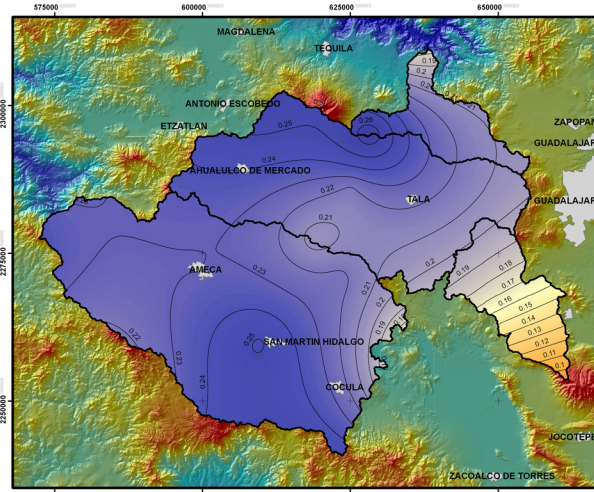
1988



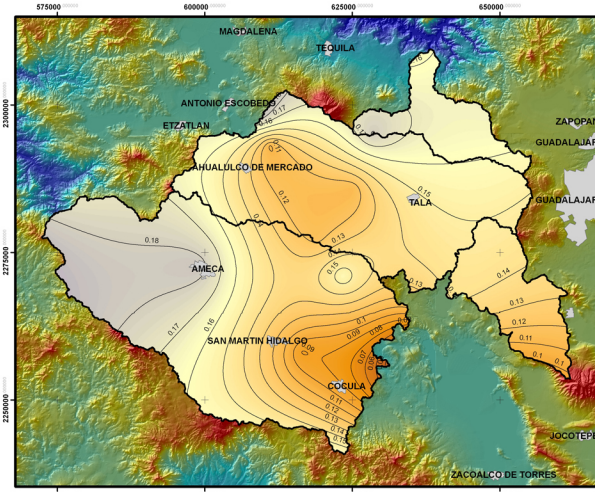
1989



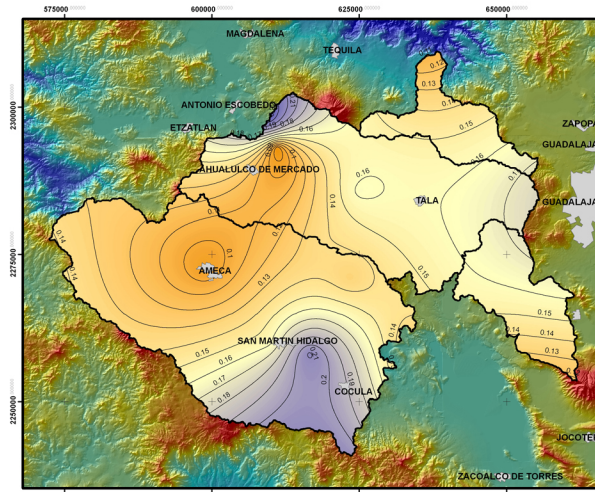
FIGURA 5.9 MAPAS DE COEFICIENTE RVP



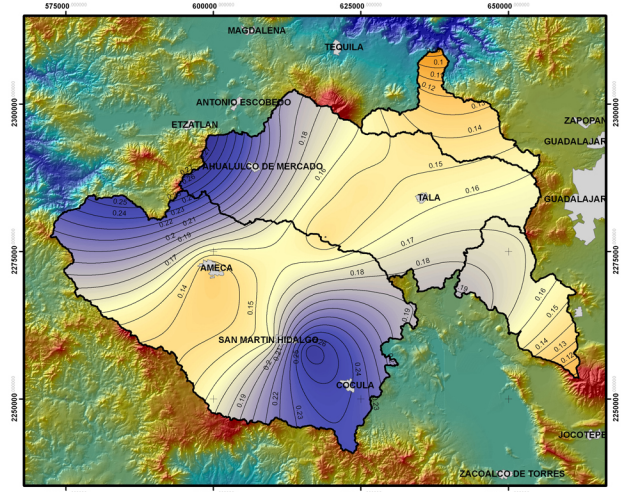
1980



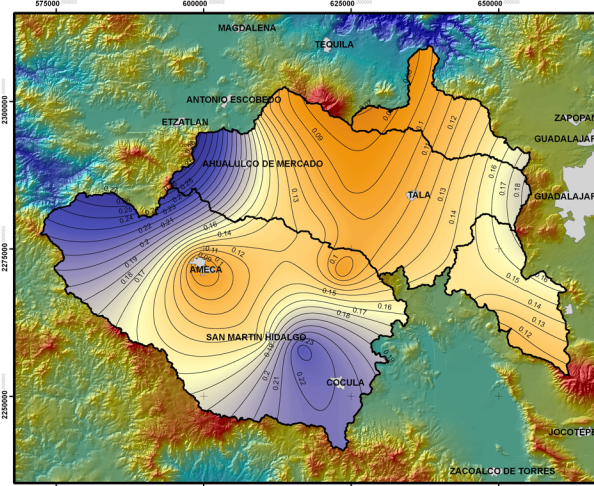
1981



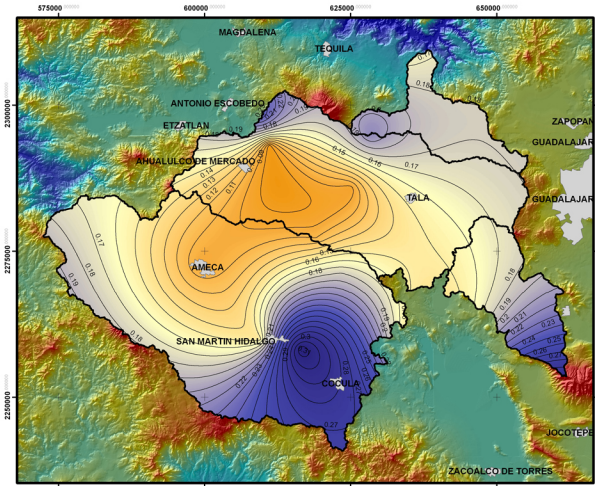
1982



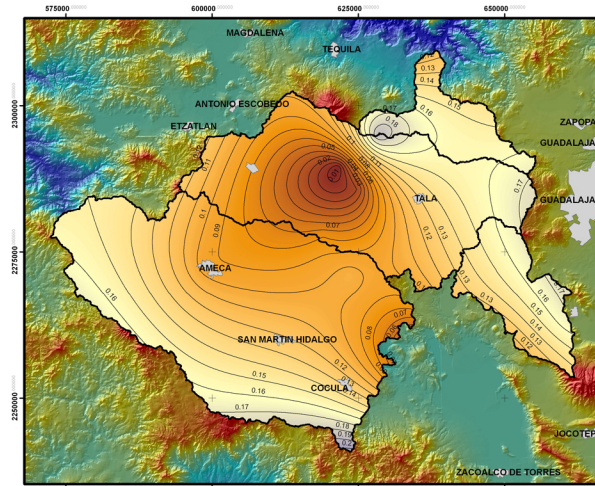
1983



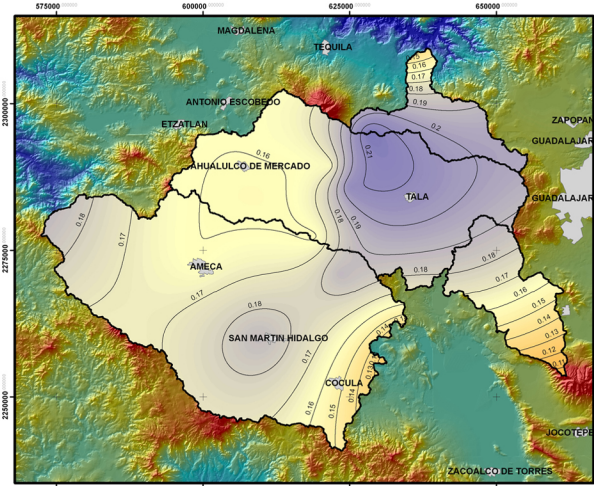
1984



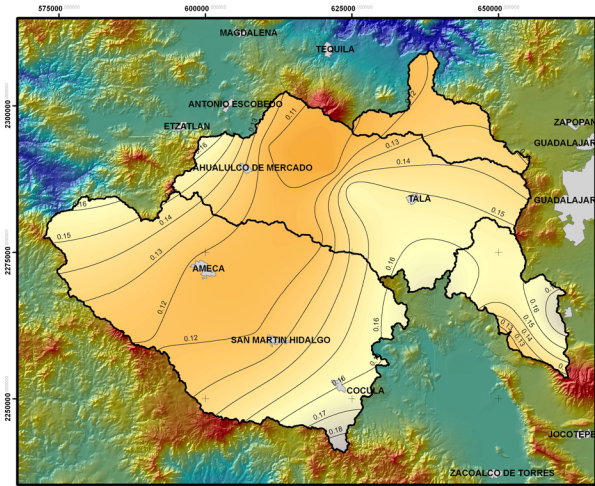
1985



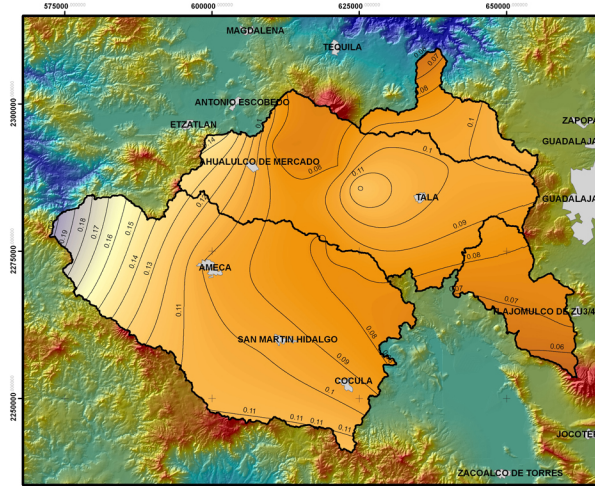
1986



1987






1988




1989

Simbología

-  Localidades
-  Microcuencas
-  Isolinías de CRVP

Coefficiente de Recarga vertical Potencial (CRVP)

 Max : 0.32

 Min : 0.002

MDE (msnm)

 Max : 2950

 Min : 318



6. DISCUSIÓN

El análisis consistió en primer lugar, en evaluar los parámetros que componen un balance hidrometeorológico durante la serie de tiempo seleccionada (1980-1989). El motivo por el cual se analizó una serie continua en el tiempo, es el darle validez a la metodología empleada, esto es, determinar si existe alguna anomalía en alguno de los años de estudio y en segunda instancia comparar las relaciones porcentuales de los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros del balance con otros trabajos similares en cuencas vecinas con características hidrológicas similares y otras alrededor del mundo.

6.1. Variación espacio-temporal de la precipitación

Como ya se mencionó la precipitación es el parámetro más importante dentro de un balance hidrometeorológico debido a que representa la única entrada al sistema. Dentro del área de estudio y durante la serie de tiempo seleccionada el año que registró mayor precipitación fue 1980 con una lámina promedio para todas las MC de 1,325 mm; por el contrario el año con la menor precipitación fue 1989 con una lámina promedio para todas las MC de 645.5 mm y la media de la precipitación para los diez años es de 895.8 mm (figura 6.1).

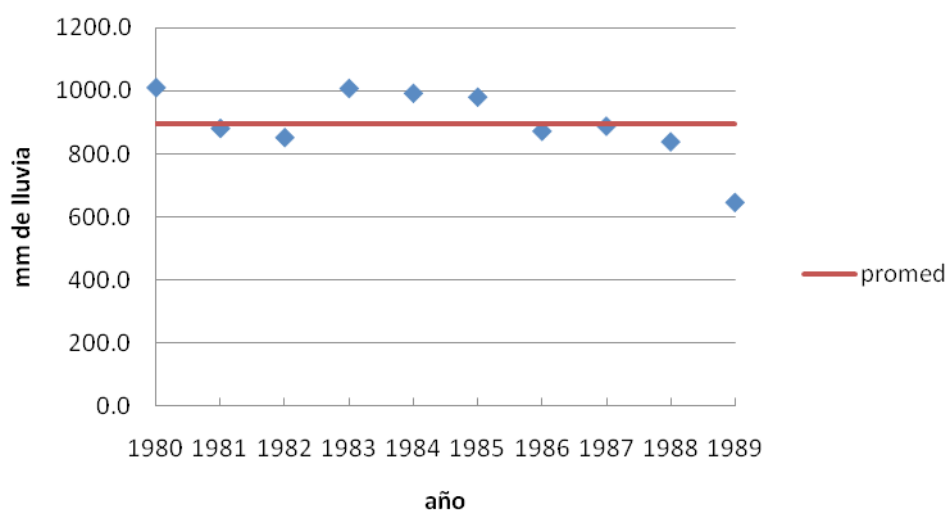


Figura 6.1. Lámina de precipitación promedio de todas las microcuencas para la serie de años seleccionada.

Especialmente la distribución de la precipitación presenta una marcada tendencia. En general las mayores láminas se presentan en las zonas altas de las cuencas (entre los 1,400 m.sn.m. y los 2,700 m.s.n.m.), donde existe una mayor cobertura vegetal (bosque primario). Por ejemplo en los alrededores del volcán de Tequila (al norte de la MC-2 y oeste

de la MC-3) o bien, en las partes altas de la zona de Ameca (en el parte aguas que divide la MC-1 y la MC-2), y en la parte sur de la MC-1 en las cercanías de la Sierra de Quila. Por otro lado las menores láminas de precipitación se observan en la MC-4 (donde cabe mencionar, no existen cuerpos de agua superficial permanentes) debido a que dicha MC presenta condiciones locales muy particulares a pesar de encontrarse dentro del límite de altura con mayor precipitación.

En comparación, la CNA en el 2000 determinó que para toda la zona de Ameca y su área de recarga, un área total de 1,391.5 km² (figura 6.2), el volumen precipitado es de 1,336.61 Mm³/año (960 mm de lluvia al año). Esto se determinó usando los valores de precipitación de ocho estaciones climatológicas (Ahualulco, Ameca, Antonio Escobedo, Arenal, El Salitre, La Vega, San Martín Hidalgo y Tala). Se construyó un plano de isoyetas a escala 1:250000, a partir del

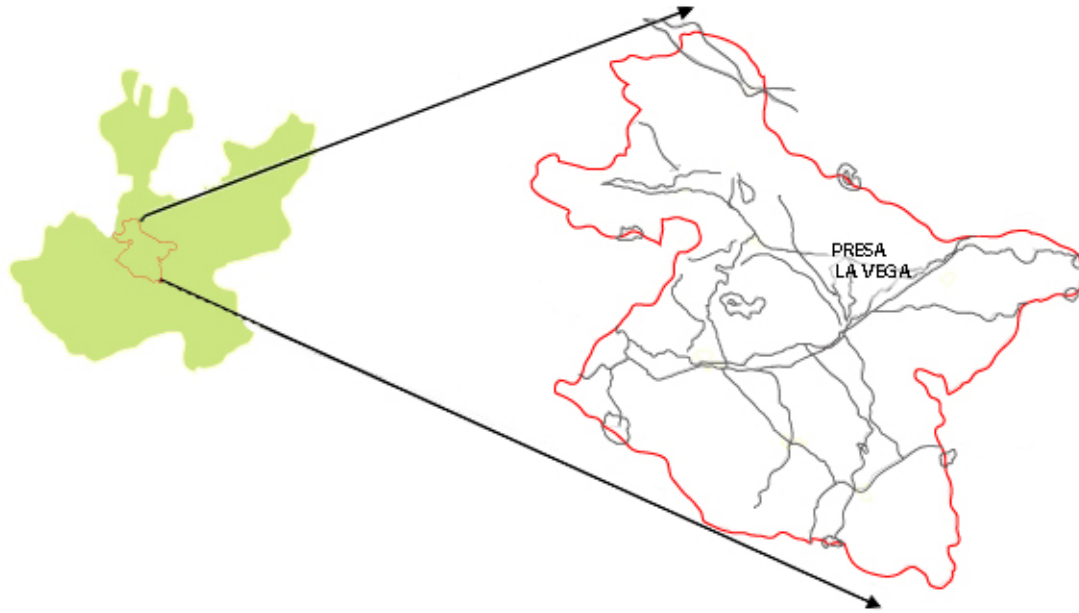


Figura 6.2. Localización del acuífero de Ameca. Fuente: CNA 2002.

En otro estudio, realizado por Geoex S.A. De C.V. en el 2004 para el Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (S.I.A.P.A.) sobre la geohidrología de las cuencas de Atemajac (la cual incluye a la ciudad de Guadalajara) y Toluquilla (la cual cubre los valles de Santa Anita, El Zapote, incluyendo el vaso de la presa del Ahogado), ubicadas al este de nuestra zona de estudio, aledañas a las MC-3 y MC-4 (figura 6.3). Calcularon mediante polígonos de Thiessen que la lámina de precipitación para la cuenca Atemajac es de 973 mm mientras que para la cuenca del Toluquilla es de 821 mm.

Con respecto a la distribución espacial de la precipitación, Voudouris et.al (2007), usaron datos hidrometeorológicos, mapas geológicos y tecnología de SIG para estimar las componentes de un balance hidrometeorológico en la cuenca de la prefectura de Korintia (Grecia) y determinó que la precipitación anual se incrementa con respecto a la elevación sobre el nivel del mar, por otro lado, Sáenz Germán (1999) indica que la humedad es mayor sobre las áreas vegetadas. En este sentido, los resultados arrojados por la metodología propuesta en este trabajo de tesis son similares

a los resultados de trabajos previos.

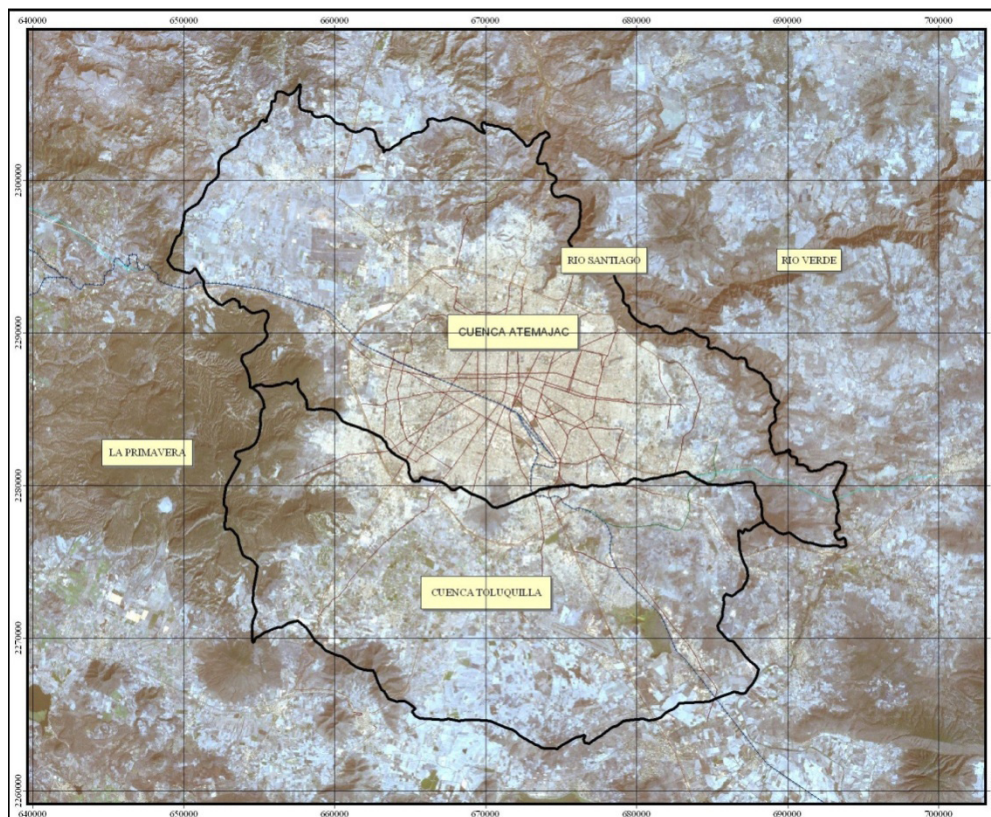


Figura 6.3. Localización de las cuencas de Toluquilla y Atemajac. Realizado por: Geoex S.A. De C.V 2004.

Por otro lado, Goovaert (2000) y Lloyd (2005) han mostrado la utilidad de métodos geoestadísticos complejos en la interpolación de datos de precipitación utilizando la correlación entre precipitación y altitud como variable externa en la interpolación por kriging universal. Sin embargo, este método no está implementado en los programas más comunes de análisis e interpolación de datos espaciales (Surfer, ArcGIS), y solo aporta errores más bajos que el kriging ordinario cuando las correlaciones entre precipitación y altitud son buenas.

6.2. Variación espacio-temporal de la evapotranspiración

Como ya se ha mencionado la evapotranspiración es el proceso combinado de evaporación y transpiración de plantas y animales mediante el cual el agua regresa a la atmósfera en forma de vapor, y representa la principal salida dentro de un balance hidrometeorológico. En la metodología propuesta en este trabajo la evapotranspiración se calculó con la ecuación de Turc, la cual está en función de la precipitación y la temperatura.

Dentro del área de estudio y durante la serie de tiempo seleccionada el año que registró mayor evapotranspiración fue 1980 con una lámina promedio para todas las MC de 653 mm; por el contrario el año con la menor evapotranspiración fue 1989 con una lámina promedio para todas las MC de 543.5 mm. En promedio para la serie de tiempo seleccionada la evapotranspiración es de 618.6 mm lo que representa un 69 % de la precipitación (figura 6.4).

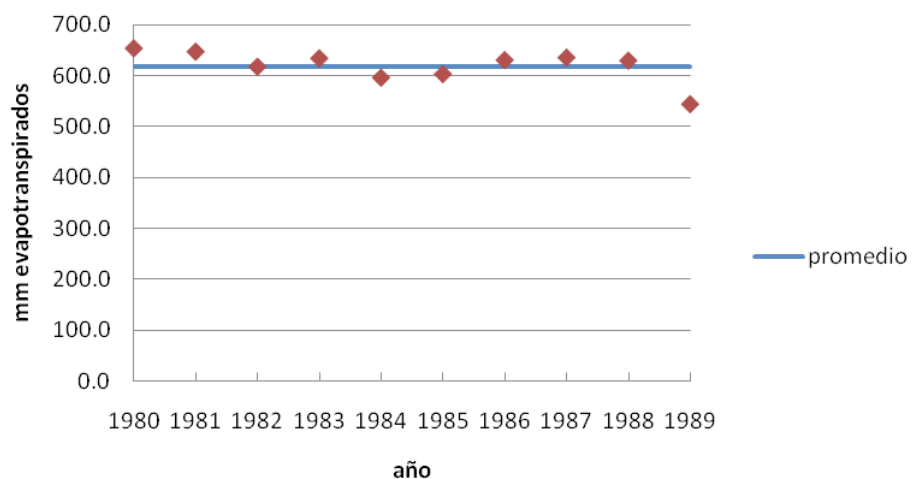


Figura 6.4 Lámina de evapotranspiración promedio de todas las cuencas para la serie de años seleccionada.

Espacialmente la distribución de la evapotranspiración es similar a la observada en la precipitación. Esto tiene mucho sentido si se considera que la evapotranspiración calculada de manera puntual a partir de los datos de las estaciones climatológicas fue una evapotranspiración real, la cual está en función del volumen de agua disponible (Martínez Pedro E., 2006) por lo que al realizar procesos de interpolación, las líneas de isoevapotranspiración van a tender a comportarse de manera similar que las isoyetas.

En comparación, CNA en el 2002 determinó que en el acuífero de Ameca y su zona de recarga volumen evapotranspirado es de 1,003.38 Mm³/año (721.07 mm/año) lo que corresponde a un 75% de la precipitación anual.

A diferencia de lo propuesto en este trabajo, la CNA utilizó el método de Thornwaite, para calcular la evapotranspiración potencial en las zonas montañosas, en donde usualmente la cobertura vegetal es nativa o inexistente, es decir, se trata de pastizales, bosques o barrancas sin vegetación. Asimismo, en los valles se utilizó el método de Blaney-Criddle, con el cultivo de caña de azúcar, como el factor principal por considerar.

Geoex S.A. De C.V. en el 2004 utilizó los métodos de Turc y Countagne para obtener la evapotranspiración de las cuencas de Atemajac y Toluquilla, y determinó que para la cuenca de Toluquilla que la evapotranspiración por Turc es de 704.92 mm (un 85.8% de la precipitación calculada para esa cuenca) y por el método de Countagne es de 635 mm (un 77.3% de la precipitación calculada para esa cuenca). Además calculó que para la cuenca de Atemajac la evapotranspiración por el método de Turc es de 813.27 mm (un 83.6% de la lámina de precipitación calculada para esa cuenca) y por el método de Countagne es de 724.5 mm (74.5% de la lámina de precipitación calculada para esa cuenca).

Por otro lado Voudouris et,al. (2007) calculó la evapotranspiración potencial a partir de la temperatura media mensual, basado en el método de Thornthwaite, y estimó que la evapotranspiración actual es del 74-81% de la precipitación anual en las tierras bajas y del 38.0-55.5% en las áreas montañosas. Olmedo García (2008), indica que del total de agua que llueve sobre los continentes (unos 110 Mkm³) vuelven a la atmósfera en forma de vapor el 63.6% (unos 70 Mkm³).

Como se observó existe una gran variedad de técnicas y ecuaciones para estimar la evapotranspiración de una cuenca, sin embargo la inclinación por alguna de ellas dependerá de las condiciones particulares de cada cuenca y sobre todo de los datos disponibles para calcular dicho parámetro. Sin embargo, es de notar que el intervalo de evapotranspiración manejado por todos los autores varía del 60-80% del valor de la precipitación, por lo que los resultados obtenidos en este trabajo pueden considerarse válidos.

6.3. Variación espacio-temporal del escurrimiento

Dentro del área de estudio y durante la serie de tiempo seleccionada el año que registró mayor escurrimiento fue 1980 con una lámina promedio para todas las MC de 153 mm, por el contrario el año con la menor la menor lámina de escurrimiento fue 1989, con una lámina promedio para todas las MC de 81.5 mm. En promedio para la serie de tiempo seleccionada el escurrimiento es de 122.9 mm lo que representa un 13.7% de la precipitación (figura 6.5).

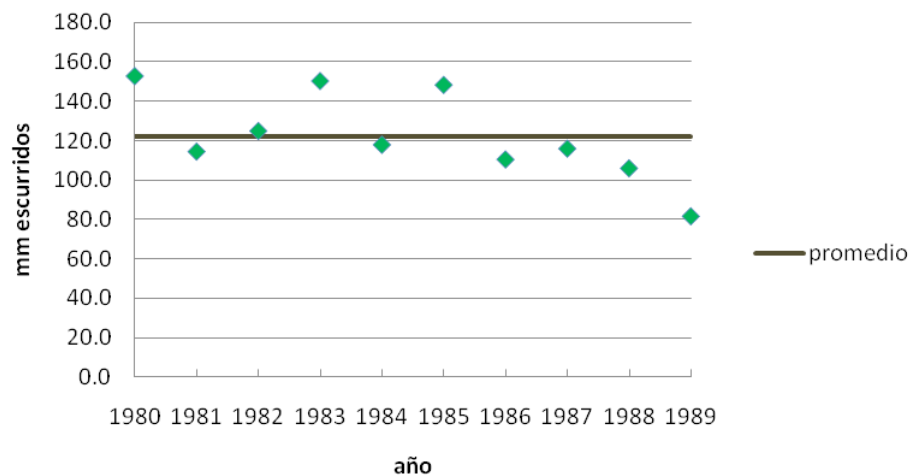


Figura 6.5. Lámina de escurrimiento promedio de todas las cuencas para la serie de años seleccionada.

Espacialmente la distribución de las líneas de isoescorrimento se comportan de manera similar a las isoyetas, esto debido a que el escurrimiento se calculó mediante un álgebra de mapas utilizando un operado que es directamente proporcional a la precipitación.

La CNA en el 2002 indica que en el acuífero de Ameca y su zona de recarga, el volumen de escurrimiento es de 144.418 Mm³/año (10.8 % de la precipitación); esto se determinó calculando el volumen medio aforado en el periodo de 1988 a 1997 de una estación hidrométrica situada a 20 km del límite de la zona geohidrológica; debido a que no se cuenta con una estación hidrométrica más cerca del límite, estos datos sirven como un volumen mínimo de escurrimiento para la subcuenca de Ameca.

Geoex S.A. De C.V. en el 2004 también utilizó la metodología de la NOM-011 para calcular el escurrimiento de las cuencas de Toluquilla y Atemajac y determinó valores muy similares a los presentados en este trabajo siendo el volumen escurrido para la cuenca de Toluquilla de 58.43 Mm³ (un 18.88% de la precipitación) y para la cuenca de Atemajac indica que el volumen escurrido es de 13.75 Mm³ (un 17.54% de la precipitación).

Es importante señalar que el escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Sáenz (1999) la define como el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno o una superficie de agua, que puede ser alimentada tanto por el exceso de la precipitación como por las aguas subterráneas. Por lo que el escurrimiento no es una variable hidrológica que pueda ser interpolada, ya que se restringe a factores climáticos como la intensidad y la duración de la precipitación y factores fisiográficos como la densidad del drenaje y los tipos de suelos y su valor se obtiene de manera directa en estaciones hidrométricas. Sin embargo la metodología propuesta en este trabajo no pretende obtener un modelado del comportamiento del escurrimiento en una cuenca sino más bien obtener un estimado anual del valor del escurrimiento mediante un método indirecto que pudiera ser comparable con valores obtenidos para cuencas vecinas con características climáticas y fisiográficas similares.

6.4. Variación espacio-temporal de la recarga vertical potencial (RVP)

El agua caída sobre la superficie del terreno se ve sometida a diversos fenómenos que la devuelven a la atmósfera (evapotranspiración), la hacen discurrir por el terreno (escorrentía) o penetrar en él (infiltración o RVP). En este último caso, el agua se ve sometida a diferentes procesos que hacen que quede retenida en el suelo (agua útil), descargue como escurrimiento subsuperficial a un manantial o siga su descenso hasta alcanzar un acuífero (Montaner, 1988). Por lo tanto el concepto de RVP se debe considerar como un volumen de agua mayor al que realmente llega al acuífero por concepto de lluvia, por lo que esta metodología solo ofrece un estimado anual de la cantidad de agua de lluvia que potencialmente pudiese recargar al acuífero así como su ocurrencia dentro de las cuencas. No se considera la cantidad de agua que llega a los acuíferos por recargas horizontales subterráneas o bien los retornos por riego.

Dentro del área de estudio y durante la serie de tiempo seleccionada a diferencia del resto de los parámetros del balance hidrometeorológico, el año que registró una mayor RVP fue 1985 con una lámina promedio para todas las MC de 234.5 mm, por el contrario el año con la menor RVP fue 1986 con una lámina promedio para todas las MC de 95.5 mm. En promedio para la serie de tiempo seleccionada la RVP es de 160.4 mm lo que representa un 17.9% de la precipitación (figura 6.6).

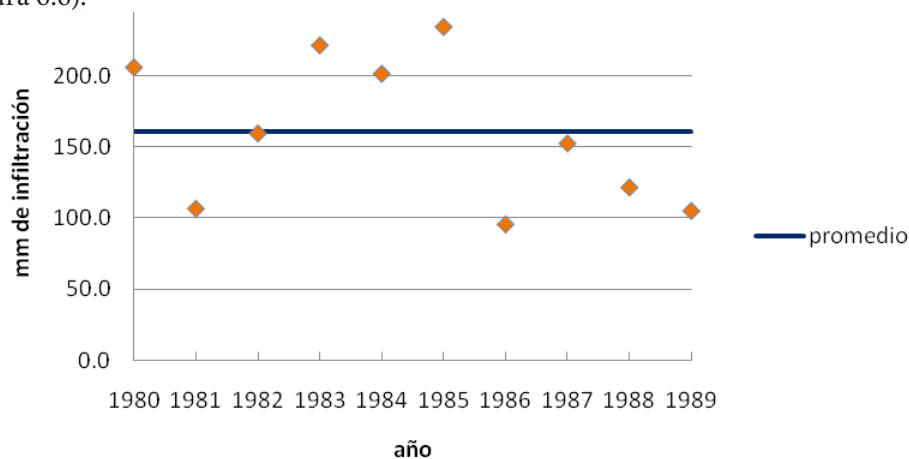


Figura 6.6. Lámina de RVP promedio de todas las cuencas para la serie de años seleccionada.

En la figura 6.7 se presenta una comparación del comportamiento de las líneas de coeficiente de recarga vertical potencial (CRPV) con respecto a las isoyetas para el año de 1986. En dicha figura se observa como los valores porcentuales de la RVP con respecto a la precipitación disminuyen desde las partes altas de la zona de estudio (en los alrededores del volcán de Tequila, en las partes altas de la zona de Ameca, y en las cercanías de la Sierra de Quila) hacia las partes bajas de la cuenca. Sin embargo es de notar que las isolíneas de CRVP muestran una distorsión, disminuyendo drásticamente su valor porcentual con respecto a las isoyetas en el área de la presa la Vega y en las zonas donde existen suelos poco permeables con un valor de K elevado (vertisoles o áreas urbanas), esto debido a la escasa o nula infiltración de esas zonas, sin embargo y debido a que la representación gráfica del fenómeno natural que se desea modelar es un mapa continuo y degradado del valor de dicho fenómeno no existen zonas con recarga cero, ya que dicho valor sería un área en blanco del mapa.

La CNA determinó en el 2002 para la zona de Ameca y su zona de recarga (un área de 1,391 km²), que llueve un volumen de 1,336.61 Mm³/año, se evapotranspiran alrededor de 1,003.38 Mm³/año, y escurren 144.41 Mm³/año, por lo que la infiltración resulta de 188.81 Mm³/año (un 14.12% del valor de la precipitación). Geoex en el 2004 estableció que para la cuenca de Atemajac con un área de 80.61 Km², la infiltración potencial determinada según lo establecido en la US SCS (1986) es de 5.48 Mm³/año un 6.99% del volumen de precipitación media anual para la cuenca. La tabla 6.1 muestra una comparación de los valores obtenidos de la RVP mediante la metodología propuesta en este trabajo con respecto a los valores obtenidos para las cuencas anteriormente mencionadas, es de notar que los valores porcentuales de la RVP para la cuenca Atemajac es muy bajo, esto debido a que en esta cuenca se encuentra la ciudad de Guadalajara en donde la carpeta asfáltica hace que los valores de infiltración sean mínimos o nulos. La figura 6.8 presenta la ubicación de las unidades hidrológicas anteriormente mencionadas y la tabla 6.1 presenta una comparación de los valores de RVP calculados para dichas unidades.

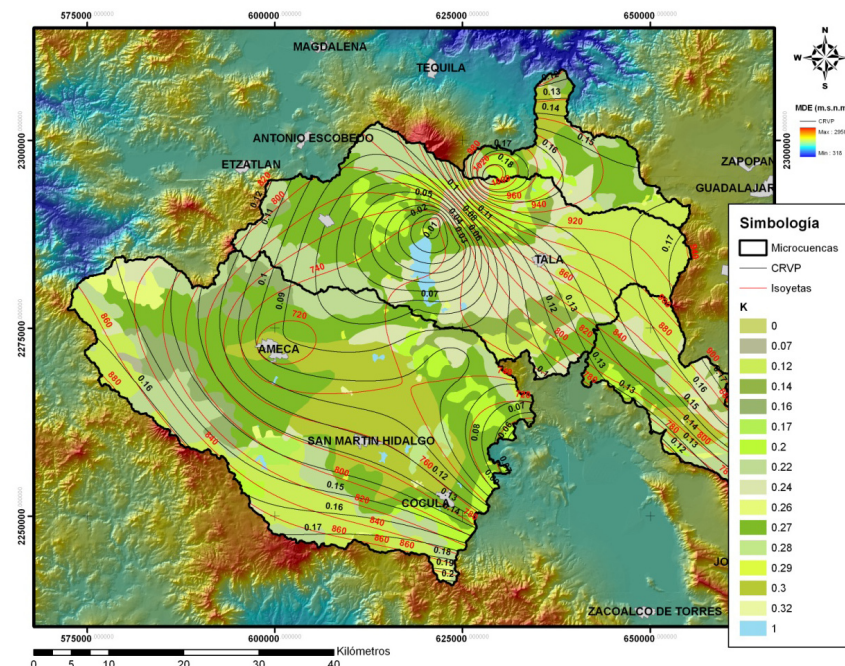


Figura 6.7. Comparación del comportamiento de las líneas de isocoficiente de RVP con respecto a las isoyetas para el año de 1986.

Tabla 6.1 Comparación de la RVP del área de estudio con respecto a unidades hidrológicas vecinas.

Unidad hidrológica	Nombre	Área (km ²)	Precipitación (Mm ³ /año)	RVP (Mm ³ /año)	RVP (%)	Fuente
Cuenca	Zona de estudio	3519.11	3152.42	564.47	17.91	Este trabajo
Acuífero	Ameca	1391.5	1336.61	188.81	14.12	CNA 2002
Cuenca	Atemajac	80.61	127.55	5.48	6.99	Geoex 2004

El volumen anual infiltrado representa un porcentaje muy variable de la precipitación anual. Experiencias realizadas en la cuenca de La Vanne (París) dan valores entre el 12 y 23% de la pluviometría anual; en el delta del río Llobregat entre el 12 y 56% y en zonas cársticas de Hungría entre el 7 y el 70%. Para el sureste costero, y por observaciones hechas en diversas cuencas, se ha estimado que el valor de la infiltración se sitúa entre el 20 y 26% de la precipitación mensual a partir de 40 mm en el primer mes tras un período seco y de 25 mm en los meses sucesivos (Thauvin Helix, 1975).

Montaner Maria, (1988) indica que para el cálculo de la escorrentía (E) e infiltración (IF) se adopta un convenio, frecuentemente utilizado en hidrogeología, que asigna a cada una de ellas el 75% y 25%, respectivamente, del superávit que se produce una vez satisfecha la demanda de ET.

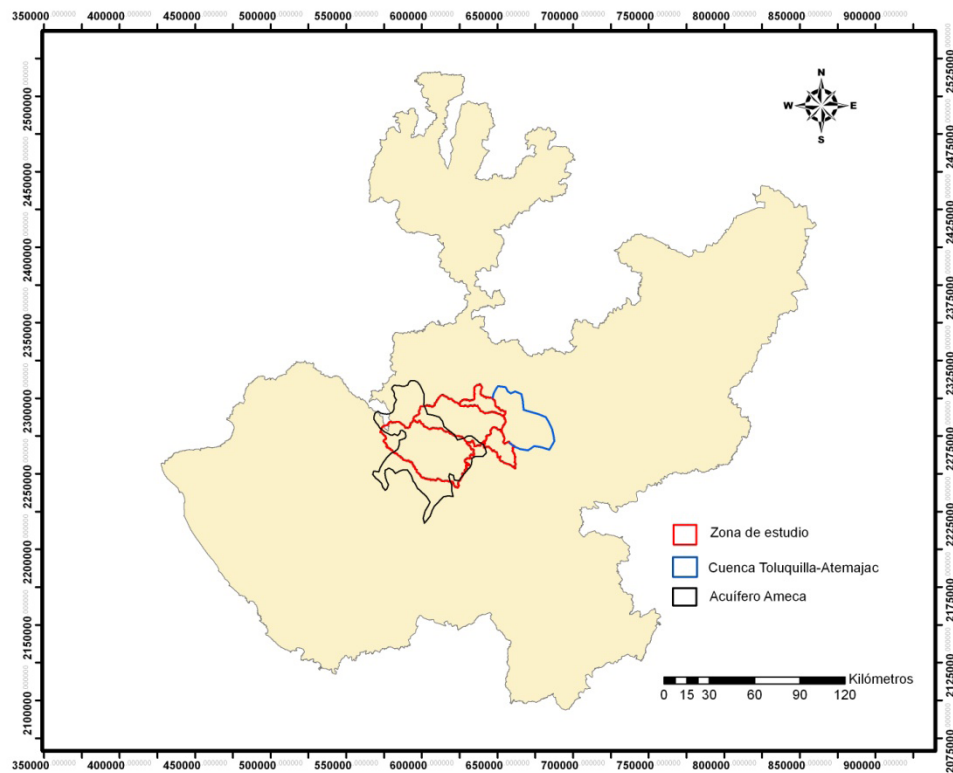


Figura 6.8. Localización de las unidades hidrológicas comparadas.

Queda claro que los datos extraídos de trabajos previos realizados en otras cuencas alrededor del mundo deben considerarse como orientadores, pero en ningún caso representativos de los terrenos que constituyen las áreas de infiltración de los diferentes acuíferos que pertenecen al área de estudio, ni de sus particulares condiciones climáticas. Por lo que la extrapolación de datos hidrometeorológicos de otras cuencas no resulta conveniente para determinar el potencial de infiltración de un área de estudio en particular y es necesario considerar las condiciones locales de una cuenca para realizar un modelo que represente con mayor precisión la naturaleza del fenómeno.

6.5. Limitantes el método propuesto

El cálculo y modelado de los parámetros hidrometeorológicos de una cuenca así como con cualquier otro fenómeno físico, implica errores y limitaciones propias de tratar de adaptar la realidad a una representación idealizada de la misma. Desde ese enfoque, la metodología propuesta en este trabajo trata de representar mediante isolíneas las condiciones hidrometeorológicas de cuatro microcuencas localizadas en el estado de Jalisco dentro de la región hidrológica administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico, basados en una base cualitativa y cuantitativa de datos climatológicos, cartografía digital y la aplicación de una herramienta SIG. Sin embargo tuvieron que ser tomadas en cuenta ciertas limitantes las cuales se discuten a continuación:

1. Para el cálculo de la evapotranspiración existen diversos métodos de los cuales destacamos los de Blaney-Criddle, Turc y Thornthwaite. Todos basados en el empleo de fórmulas que relacionan la evapotranspiración con factores climáticos de diferente grado de dificultad en su obtención-temperatura, precipitación, radiación solar incidente, velocidad del viento, etc.- y otros dependientes del tipo de cultivo, clases de suelo, agua disponible, rendimiento de las cosechas, etc. En el desarrollo de este trabajo, se utilizó el método de Turc el cual es solo una aproximación de la evapotranspiración. Hoy en día hay métodos más precisos para el cálculo de la ET, por ejemplo la (FAO, 1990) recomienda usar el método de Penman; incluso existen dispositivos que miden la ET. Sin embargo la inclinación por el método de Turc se debe a que las variables de las que depende la ecuación son justamente los datos que proporciona de manera gratuita el SMN, y la obtención de otros datos como radiación solar diaria o procesado de imágenes satelitales mediante percepción remota para determinar el tipo de cultivo implicaría tiempo y recursos no contemplados en los alcances de este trabajo.

2. El cálculo del escurrimiento se debe hacer con mediciones directas en estaciones hidrométricas ubicadas al inicio y fin de la corriente de agua superficial principal de cada cuenca. Pero debido a que generalmente no se cuenta con tal información se utilizaron mapas digitales 1:1000000 en formato vectorial descargados de manera gratuita del INEGI y siguiendo la metodología propuesta por la NOM-011 se determinó un coeficiente de escurrimiento. Sin embargo si se pretende realizar un estimado más preciso de dicho parámetro mediante la metodología propuesta en este trabajo, se deben tomar en cuenta las condiciones reales del suelo provocadas por la erosión y la actividad antrópica, por lo que sería necesario una cartografía edafológica y de usos de suelo a detalle (1:20000) de las condiciones reales de la cuenca para los años seleccionados.

3. Como ya se mencionó, el escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Por lo tanto la interpolación de dicho fenómeno para la obtención de mapas de láminas de isoescorrimento en el área de estudio resulta poco apropiada para describir el comportamiento y la distribución del fenómeno, el cual se ve restringido por las fronteras que representan los cauces, sin embargo sí ofrece un estimado anual bastante aproximado del escurrimiento real de las cuencas en estudio, comparables con los valores porcentuales obtenidos en cuencas vecinas con condiciones hidrometeorológicas similares.

4. Los términos de la ecuación de balance hidrometeorológico (precipitación, evapotranspiración y escurrimiento) se estimaron de manera independiente, lo que implica un error de cálculo para cada uno de ellos. Debido a que la infiltración se calculó despejándola de la ecuación de balance existe un error acumulado. Sin embargo la RVP siempre es mayor al volumen de agua que realmente llega a los acuíferos por términos de recarga vertical y por otro lado los valores porcentuales de infiltración obtenidos en trabajos previos en cuencas vecinas al área de estudio son similares a los resultados obtenidos por esta metodología, por lo que dichos valores se pueden considerar como válidos.

5. Los valores obtenidos para cada parámetro del balance hidrometeorológico mediante la metodología propuesta en este trabajo son un valor acumulado anual en mm de agua por lo que se supone que todos los fenómenos ocurren en un solo evento y de manera casi simultánea. Esto es: suponer que el agua que cae sobre las cuencas lo hace en una sola lluvia y que los procesos de evapotranspiración, escurrimiento e infiltración ocurran inmediatamente después de que cae dicha lluvia. Sin embargo si se desea obtener un mejor modelado del comportamiento de la infiltración o RVP es necesario considerar factores como la humedad inicial del suelo-condicionada por las estaciones del año-, que influye de manera directa en la capacidad de infiltración del suelo.

6.6. Líneas futuras de investigación

El incremento en la demanda de agua por parte de la sociedad ha provocado cambios en el ciclo hidrológico que pone en riesgo la calidad y la cantidad de agua capaz de satisfacer los requerimientos actuales y de generaciones futuras, pero por otro lado también ha motivado el desarrollo científico de técnicas y herramientas en el ámbito de la hidrología y la hidrogeología que modelen las condiciones hidrometeorológicas de una cuenca permitiendo así, realizar gestiones adecuadas que regulen de mejor manera los recursos hídricos de una región. En este contexto, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ofrece plena capacidad para esta representación haciendo uso de algoritmos que explotan los atributos y recursos de los sistemas digitales (Díaz et. al 2008).

En la actualidad los SIG cuentan con herramientas que permiten combinar el análisis estadístico e interpolación espacial para crear superficies continuas de variables climáticas. La interpolación de datos climáticos ha sido estudiada ampliamente en el mundo, se han utilizado distintas técnicas para determinar superficies continuas de variables climáticas como temperatura y precipitación (Dressler 2000). En México, a pesar de la importancia que representa la


información para la toma de decisiones, han sido pocos los esfuerzos realizados para la cuantificación de la bondad de las distintos métodos de interpolación de datos climáticos Díaz et al (2006).

Izquierdo (2007), realizó un estudio comparativo de diferentes métodos de interpolación para la elaboración de mapas de precipitación en la isla de La Gomera (Islas Canarias), indicó que el uso de los datos de altitud como variable externa en la interpolación por kriging universal en la elaboración de mapas de precipitación aporta beneficios respecto al kriging ordinario. Díaz et. al (2008) realizaron un estudio comparativo de cuatro métodos de interpolación: inverso de la distancia, kriging, co-kriging y thin plate smoothing spline, de datos puntuales de precipitación pluvial en la región de sotavento y barlovento de la República Mexicana. La información fue analizada para detectar si existe en esta región una relación de la precipitación pluvial con las variables de elevación, longitud y distancia al océano. Se observó que la superficie generada con el método thin plate smoothing spline fue superior al registrar el menor cuadrado medio del error de predicción, seguido por el método kriging y co-kriging empleando el modelo gaussiano, cabe señalar, que con co kriging se utilizó la covariable elevación a pesar de que no se detectó una relación significativa entre esta variable y precipitación pluvial.

Carrera Hernandez y Gaskin (2006) hicieron un análisis espacio temporal de la precipitación y la temperatura diaria en la cuenca de México. Este trabajo analiza la variación temporal de la precipitación, temperatura máxima y mínima y su correlación con la elevación y si esta relación debe ser utilizada cuando los datos diarios se interpolan. Para lograr esto, la distribución mensual de estas variables se deriva de interpolaciones diarias, que se compara con su valor acumulado mensual para cada estación climatológica. Los métodos de interpolación utilizados para llevar a cabo el análisis fueron kriging ordinario (OK), kriging con deriva externa (KED), kriging en bloque con Deriva Externa (BKED), kriging ordinario con vecino cercano (OKL) y kriging con deriva externa en y vecino cercano (KEDL). Para este análisis se utilizaron los datos climatológicos de aproximadamente 200 estaciones ubicadas en el Cuenca de México entre junio de 1978 y junio de 1985. En este estudio, el uso de la elevación como una variable secundaria mejora la variación espacial de todos los campos climatológicos incluso cuando exhiben una baja correlación con la altitud. De acuerdo con los análisis presentados, el uso de kriging con derivada exterior en un vecino cercano (KEDL) se recomienda para llevar a cabo la interpolación espacial de las precipitaciones, (Una variable muy heterogénea), mientras que kriging con deriva externa (KED) se recomienda llevar a cabo la interpolación de un campo más continua, como mínimo y máximo de temperatura. En el caso de una densa red climatológica, KEDL probablemente mejoraría el patrón espacial de la temperatura mínima y máxima.

Además Carrera Hernandez y Gaskin (2008) desarrollaron una metodología para el cálculo del balance diario del agua en el suelo de la cuenca de México. El balance del agua de suelo requiere de la distribución espacial de las variables climatológicas las cuales fueron usadas para obtener una evapotranspiración de referencia (ET_o). La evapotranspiración real (ET_{act}) se determinó usando la metodología propuesta por la FAO-56 (Allen R., 1998) mediante el uso de la ET_o y diferentes coeficientes, como el coeficiente dependiente de la vegetación (K_{cb}), el coeficiente de estrés hídrico (K_{st}) y el coeficiente de evaporación de suelos (K_e).

En lo que respecta al escurrimiento Gaytán, et. al (2008) construyeron un modelo de escurrimiento para el lago de Santa Ana (Zacatecas), mediante la aplicación combinada de dos modelos de simulación de procesos hidrológicos: El Watershed Modeling System (WMS) y el Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). El WMS



fue utilizado para la delimitación y determinación de los parámetros geométricos de la cuenca natural, a partir del uso de modelos digitales de elevación y la información correspondiente de las estructuras hidráulicas construidas por el hombre, como son los drenes. El HEC-HMS fue utilizado para la estimación de los hidrogramas de escurrimientos utilizando la información histórica de las precipitaciones y la batimetría del lago. Se observó que en los últimos años las actividades antrópicas han modificado sustantivamente las características de escurrimiento de la cuenca.

Voudouris (2007) también desarrolló un balance hidrometeorológico utilizando SIG, sin embargo y a diferencia con lo propuesto en este trabajo de tesis, él determinó un coeficiente de infiltración para cada formación geológica. La distribución espacial de la de infiltración derivó del producto de un mapa en formato raster de coeficiente de infiltración con el raster de precipitación anual acumulada. Basado en ese coeficiente y mapas geológicos en formatos vectoriales, se estimó que el total de la infiltración es de 290.6 Mm³/año o 20.9% de la precipitación anual. Lo que corresponde considerablemente con los valores obtenidos en la metodología propuesta en este trabajo (17.9 % de la precipitación anual).

Queda claro que en la hidrología al igual que en otras ciencias, el desarrollo de nuevos métodos de medición han permitido avances significativos en el conocimiento de las relaciones funcionales del agua dentro de una cuenca. Sin embargo es fácil incurrir en deficiencias de tipo metodológico para el análisis de cuencas cuando no se cuenta con suficientes datos (Mendoza 2002).

7. CONCLUSIONES

1. Este trabajo ha mostrado el desarrollo de una metodología sencilla, práctica y fácilmente reproducible -lo que la vuelve conveniente para usos en consultorías- para estimar las variaciones espacio-temporales de la RVP de acuíferos utilizando una herramienta SIG.

La metodología empleada resulta sencilla ya que los datos utilizados para el cálculo de la RVP son datos gratuitos y de fácil acceso, descargables de páginas de internet de entidades federativas (datos climáticos obtenidos de estaciones climatológicas del SMN y cartografía digital del INEGI). Es práctica ya que su implementación en una plataforma SIG facilita los cálculos de interpolación, álgebra de mapas y el análisis espacial de los parámetros que conforman un balance hidrometeorológico en especial de la RVP. Y es reproducible, ya que cualquier usuario SIG que posea los datos requeridos por el sistema puede realizar un balance hidrometeorológico de cualquier cuenca alrededor del mundo y determinar la variación espacio-temporal de la RVP de acuíferos.

2. En el área de estudio consta de cuatro microcuencas (Cocula, Presa la Vega, Arenal, Zuñiga) localizadas en el centro del estado de Jalisco al oeste de la ciudad de Guadalajara dentro de la Region Hidrológica Administrativa VIII (Lerma-Santiago-Pacífico), abarca un área total de 3519 km², en ella caen en promedio 895.8 mm de lluvia anualmente, de los cuales se evapotranspiran unos 618.6 mm (un 69.1% del agua de lluvia), 122.4 mm se escurren por la superficie (13.7% de la precipitación) y el restante unos 160.4 mm sirven como RVP a los acuíferos (17.9 % de la precipitación). Valores razonablemente consistentes con la RVP reportada por la CNA (2000) para el acuífero Ameca (el cual abarca parte de la zona de estudio) del orden de 14.12 % del agua de lluvia lo que implica una diferencia del 3.78% con respecto a los datos oficiales. En la figura 7.1 se presentan los valores porcentuales de evapotranspiración, escurrimiento e infiltración o RVP promedios para todas las cuencas durante la serie de años analizada.

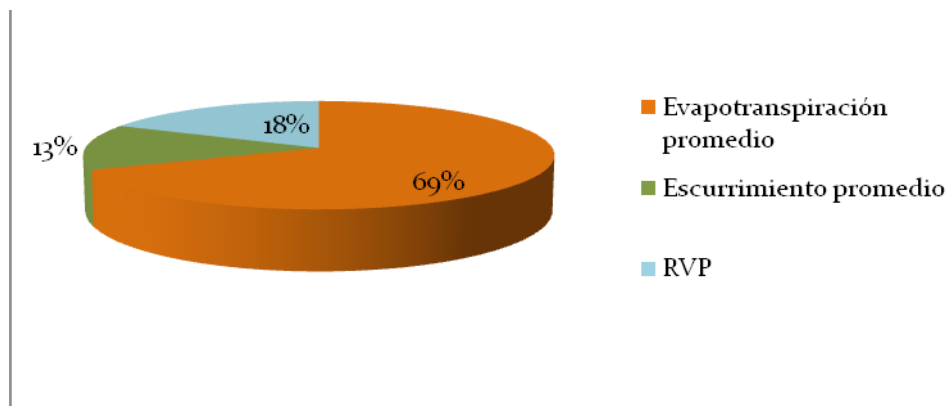


Figura 7.1 Valores porcentuales de evapotranspiración, escurrimiento e infiltración o RVP promedios para todas las cuencas durante la serie de años analizada.

3. En lo que respecta a la distribución espacial de los parámetros que conforman el balance hidrometeorológico, se notó que en general las mayores láminas de precipitación y evapotranspiración y RVP se presentan en las zonas altas de las cuencas, en donde existe una menor influencia antrópica y una mayor cobertura vegetal (bosque primario). Por ejemplo en los alrededores del volcán de tequila (al norte de la MC-2 y oeste de la MC-3) o bien en las partes altas de la zona de Ameca (en el parte aguas que divide la MC-1 y la MC-2), y en la parte sur de la MC-1 en las cercanías de la Sierra de Quila.

4. Por otro lado se observa que los componentes que conforman un balance hidrometeorológico (precipitación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración o RVP), se comportan de manera similar en cada uno de los años de la serie de tiempo seleccionada (figura 7.2) tanto en su ocurrencia dentro de las cuencas como en la relación entre sus valores. Esto se debe a que los algoritmos matemáticos utilizados tanto en la interpolación de datos georeferenciados como en el álgebra de mapas se encuentran en función de la precipitación por lo que los demás parámetros hidrometeorológicos serán una proporción de esta.

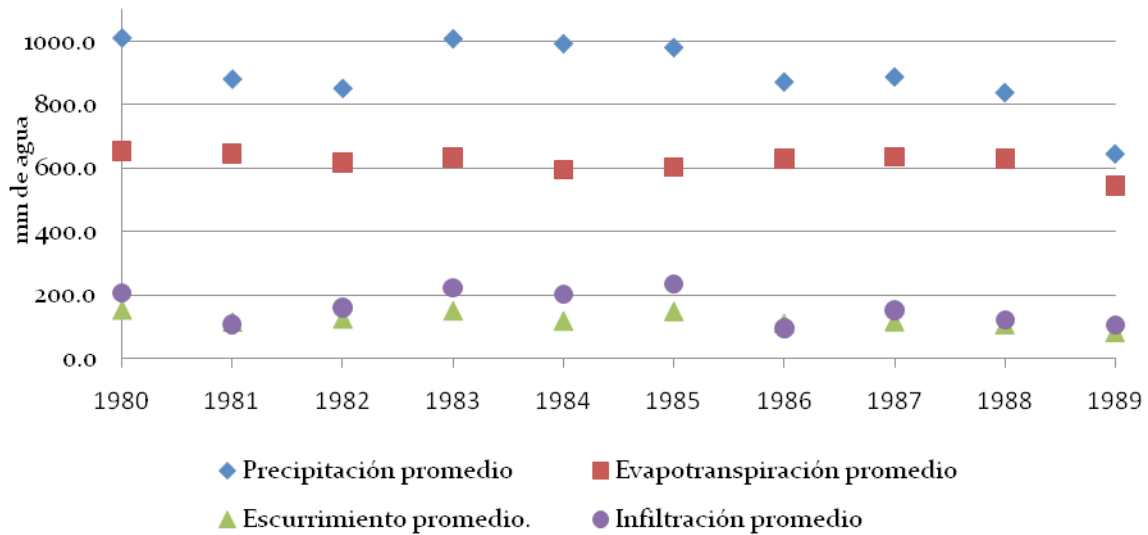


Figura 7.2. Gráfica comparativa de los parámetros hidrometeorológicos durante la serie de años seleccionada.

5. El agua no es sólo un recurso natural necesario para el desarrollo sustentable de un país, sino también un bien común y un derecho universal de cualquier ser viviente. Por lo que el desarrollo de técnicas y herramientas en el ámbito de la hidrología y la hidrogeología además de la generación de leyes y organismos autónomos y transparentes que permitan una gestión, comercio, distribución, reciclamiento, regularización y buena administración de los recursos hídricos resulta indispensable para satisfacer los requerimientos actuales y de generaciones futuras en armonía con el medio ambiente y el desarrollo social.

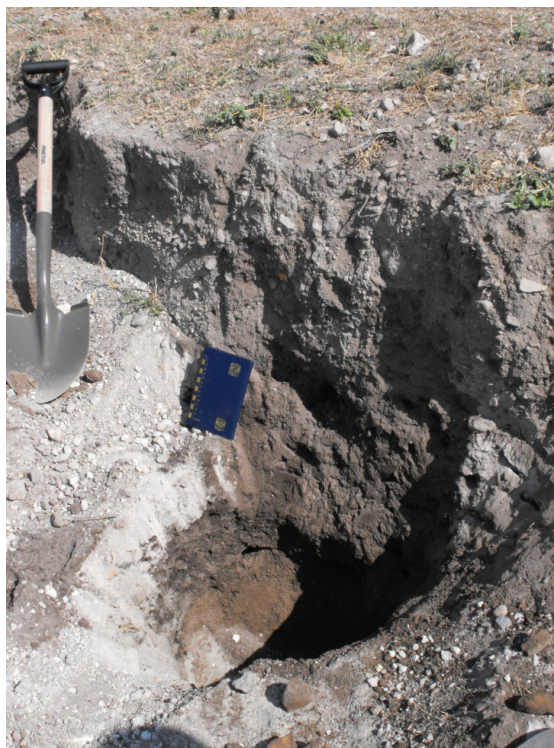
ANEXOS

Anexo 1. Formatos de campo para los PVE.

Fecha:	Jueves 15 de enero del 2009	Hora: 11:00 hrs	Punto: PVE-1
Coordenadas:	X= 635660	Y= 2302061	Datum: WGS84

Horizonte o capa:	A	B
Denominación	Húmico	Lixiviación
Profundidad	40 cm	50 cm
Separación	Tenue	Degradada
Reacción		
Humedad	Seca	Húmedo
Estructura	Masiva	Granular
Porosidad	Alta	Alta
Arginales		
Cutanes		
Color seco	Gris	Café
Color húmedo	Gris	Café oscuro
Consistencia	Arenosa	Arenosa-arcillosa
Adhesividad	Matriz arcillosa	No
Cementación	No	No
Textura	Clástica	Granular
Grietas	No	No
Cristales.	No	No
Nódulos.		
Moteado.		
Raíces.	Si (30 cm)	No
Superficie.		
Drenaje interno.	Si	

Figura A.1 Perfil en el PVE-1.



Observaciones: El suelo se encuentra cubierto por un depósito aluvial más reciente, es posible deducir esto ya que en la parte superior del perfil se aprecian clastos angulosos de hasta 15 cm, lo cual nos indica un horizonte sin desarrollo producto de sedimentos que sufrieron poco transporte y cubrieron a un suelo de textura arenosa mejor clasificado.

Fecha:	Jueves 15 de enero del 2009	Hora: 15:00 hrs	Punto: PVE-2
Coordenadas:	X= 614680	Y= 2296022	Datum: WGS84

Horizonte o capa:	A	C
Denominación	Húmico	Material Parental
Profundidad	45 (cm)	> 70 (cm)
Separación	Degradada	Degradada
Reacción		
Humedad	Fresca	Fresca
Estructura	Arcillosa	Clástica-arcillosa
Porosidad	Media	
Arginales		
Cutanes		
Color seco	Pardo	
Color húmedo	Rojizo	
Consistencia	Areno-arcillosa	
Adhesividad		
Cementación	No	
Textura		Clástica
Grietas	Si	
Cristales.	Si (sal)	
Nódulos.		
Moteado.		
Raíces.		
Superficie.		
Drenaje interno.		

Figura A.2. Perfil en el PVE-2.



Observaciones: El suelo de color rojo con un horizonte superficial más oscura, este suelo se encuentra cubierto por un material de color gris, mal clasificado y con un alto contenido de gravas, este material se trata de un “antroposol” (un suelo de génesis humana), el cual fue usado para aplanar el terreno..

Fecha:	Jueves 15 de enero del 2009	Hora: 17:30 hrs	Punto: PVE-3
Coordenadas:	X=604030	Y=2269955	Datum: WGS84

Horizonte o capa:	A	C
Denominación	Húmico	Material parental
Profundidad	20 (cm)	
Separación		
Reacción		
Humedad	Muy fresco	
Estructura	Prismática	
Porosidad	Muy baja	
Arginales		
Cutanes		
Color seco	Pardo	
Color húmedo	Pardo oscuro	
Consistencia		
Adhesividad	Alta	
Cementación	No	
Textura	Arcillosa	
Grietas	Si	
Cristales.	No	
Nódulos.	No	
Moteado.	No	
Raíces.	Si	
Superficie.		
Drenaje interno.	No	

Figura A.3. Perfil en el PVE-3.



Observaciones: _____

Fecha:	Viernes 15 de Enero del 2009	Hora: 17:45 hrs	Punto: PVE-4
Coordenadas:	X=639951	Y=2297611	Datum: WGS84

Horizonte o capa:	A	B
Denominación	Húmico	Lixiviados
Profundidad	10 (cm)	>1 (m)
Separación	Marcada	Marcada
Reacción		
Humedad	Fresco	Seco
Estructura	Granular	Masiva
Porosidad	Media	Media
Arginales	Si	Si
Cutanes	No	No
Color seco	Pardo claro	Pardo claro
Color húmedo	Pardo oscuro	Pardo
Consistencia	Arenosa	Areno-arcillosa
Adhesividad	Poca	Carente
Cementación	No	No
Textura		
Grietas	Si	No
Cristales.	Sales	No
Nódulos.		
Moteado.	No	No
Raíces.	Si	No
Superficie.		
Drenaje interno.	Si	Si

Figura A.4. Perfil en el PVE-4.

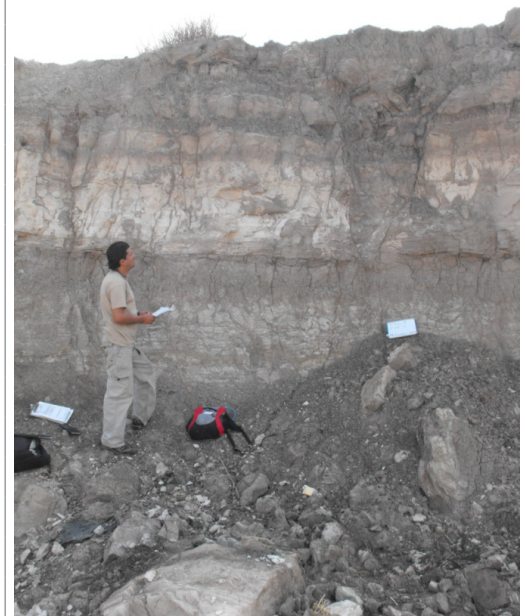


Observaciones: _____

Fecha:	Lunes 19 de Enero del 2009	Hora: 15:00 hrs	Punto: PVE-5
Coordenadas:	X=629620	Y=2283147	Datum: WGS84

Horizonte o capa:	A	B	C
Denominación	Húmico	Cambico	Material Parental
Profundidad	15 (cm)	60 (cm)	140 (cm)
Separación	Difuso	Difuso	Difuso
Reacción			
Humedad			
Estructura			
Porosidad	Alta	Alta	
Arginales			
Cutanes			
Color seco	Gris oscuro	Gris claro	Gris claro
Color húmedo	Gris oscuro	Pardo oscuro	Gris oscuro
Consistencia			
Adhesividad	Adhesivo	Adhesivo	Adhesivo
Cementación			
Textura			
Grietas	Si	No	No
Cristales.		10% Af	
Nódulos.			
Moteado.			
Raíces.			
Superficie.			
Drenaje interno.			

Figura A.5. Perfil en el PVE-5.



Observaciones:

El horizonte húmico es muy pequeño (10-15 cm) y presenta un pobre desarrollo de raíces.

El horizonte B se encuentra muy agrietado y posee poco contenido de materia orgánica.

Anexo 2. Resultados de laboratorio

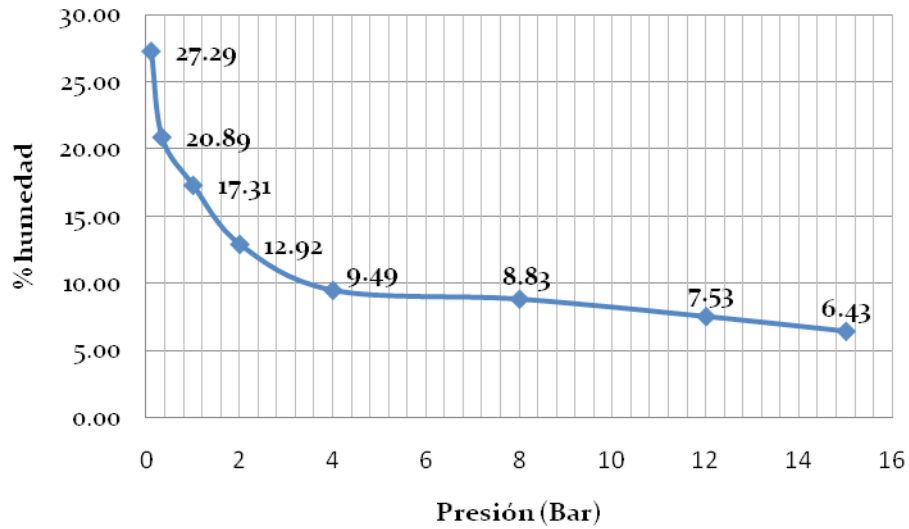


Figura A.6. Curva de retención de humedad para el PVE-1A.

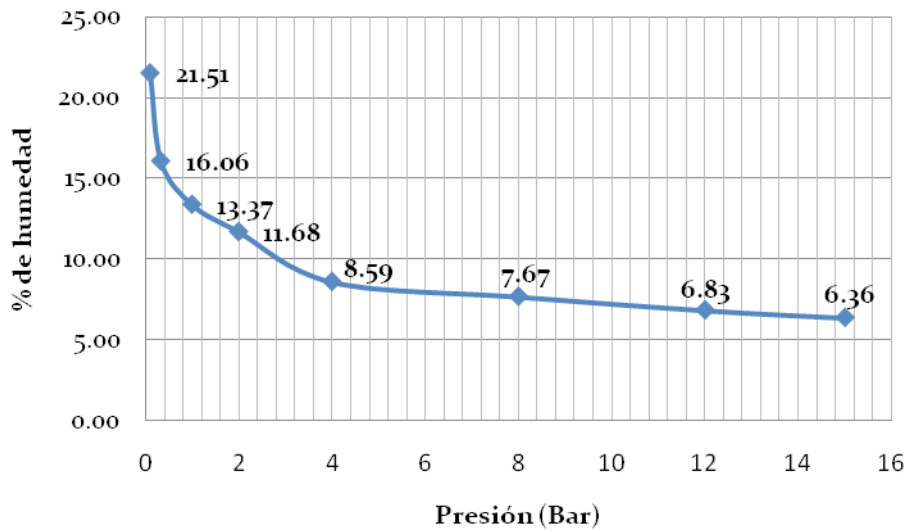


Figura A.7. Curva de retención de humedad para el PVE-1B.

En el PVE-1 se puede apreciar que el horizonte A tiene una capacidad de campo mayor que el horizonte B (20.89% y 16.06% respectivamente), lo que implica que el horizonte A posee una mayor cantidad de arcillas expansibles (arcillas 2:1) por lo que su capacidad de infiltración se ve limitada.

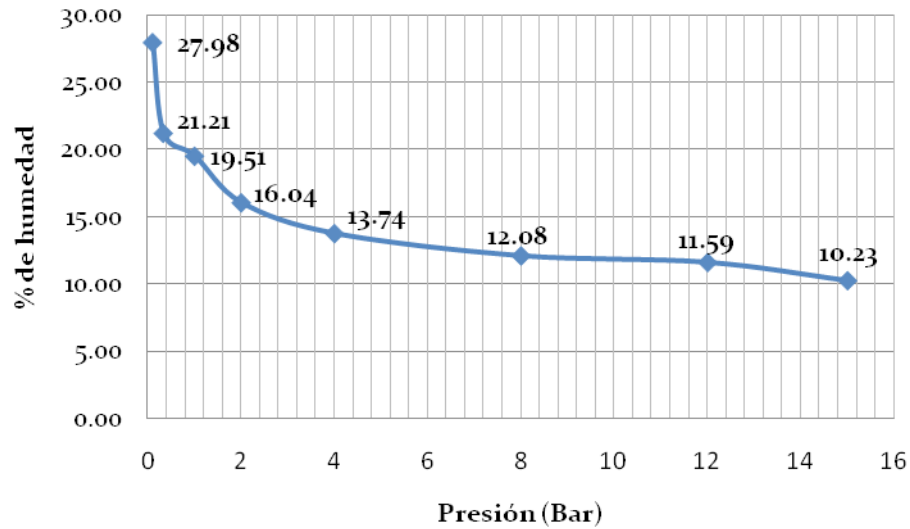


Figura A.8. Curva de retención de humedad para el PVE-2A.

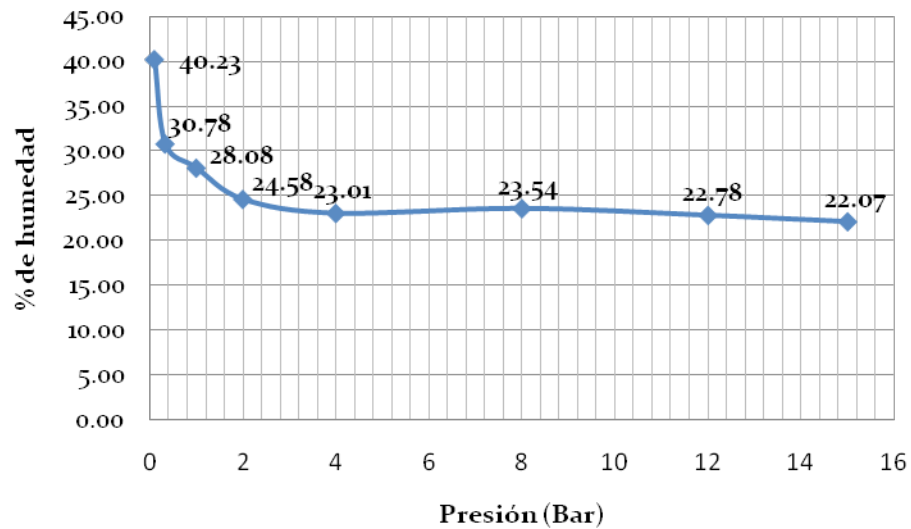


Figura A.9. Curva de retención de humedad para el PVE-2B.

El PVE-2 al contrario que en el caso anterior presenta un horizonte B con una capacidad de campo mayor que en horizonte A (30.78% y 21.21% respectivamente), esto implica que el horizonte A no contiene muchas arcillas expansibles a comparación del horizonte B lo que lo vuelve un suelo con mayor capacidad de infiltración.

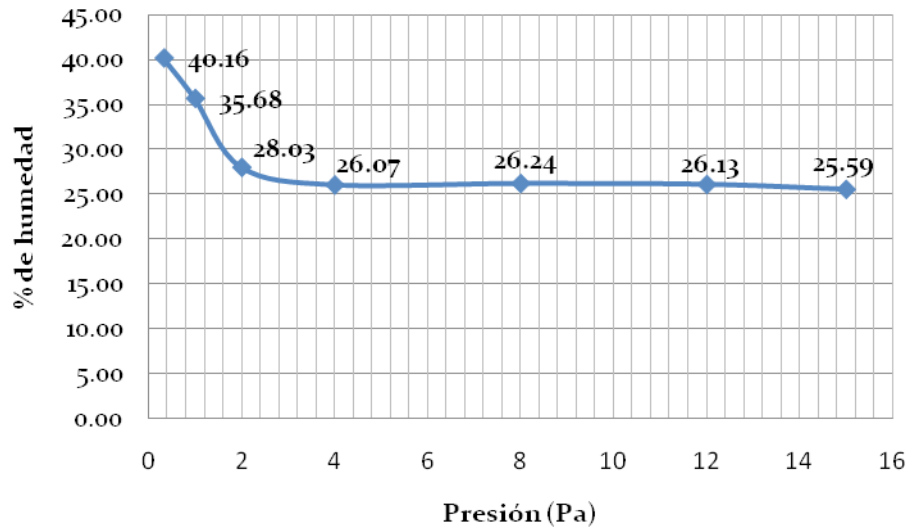


Figura A.10. Curva de retención de humedad para el PVE-3.

El PVE-3 se trata de un Vertisol el cual tiene una alta cantidad de arcillas expansibles 2:1 lo que lo vuelve un suelo sumamente impermeable, eso se ve reflejado en su elevada capacidad de campo de 35%.

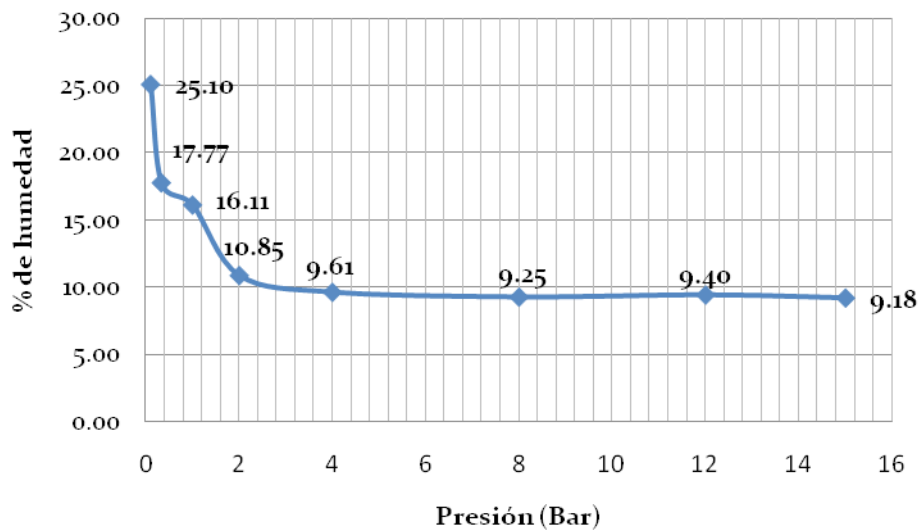


Figura A.11. Curva de retención de humedad para el PVE-4A.

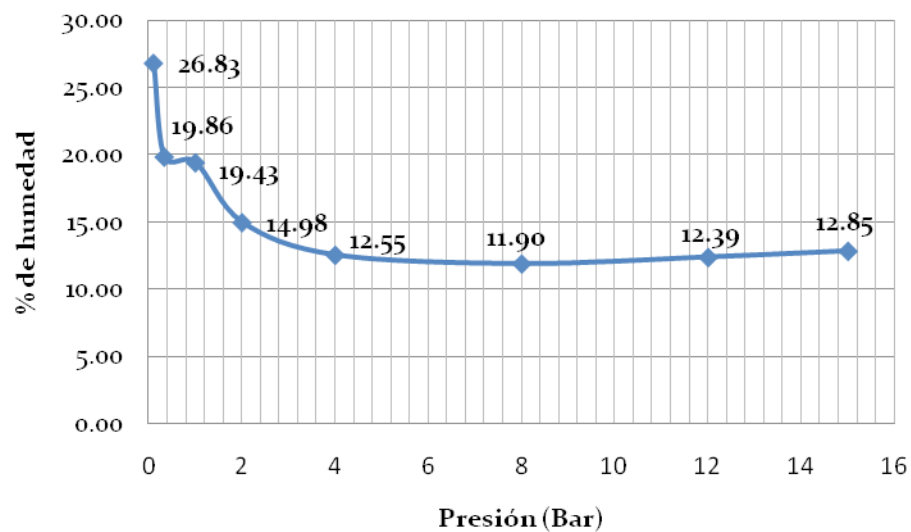


Figura A.12. Curva de retención de humedad para el PVE-4B.

El VPE-4 también presenta un horizonte B argílico con una capacidad de campo de 19.86% y un horizonte A más arenoso, lo que lo vuelve un suelo con mayor capacidad de infiltración.

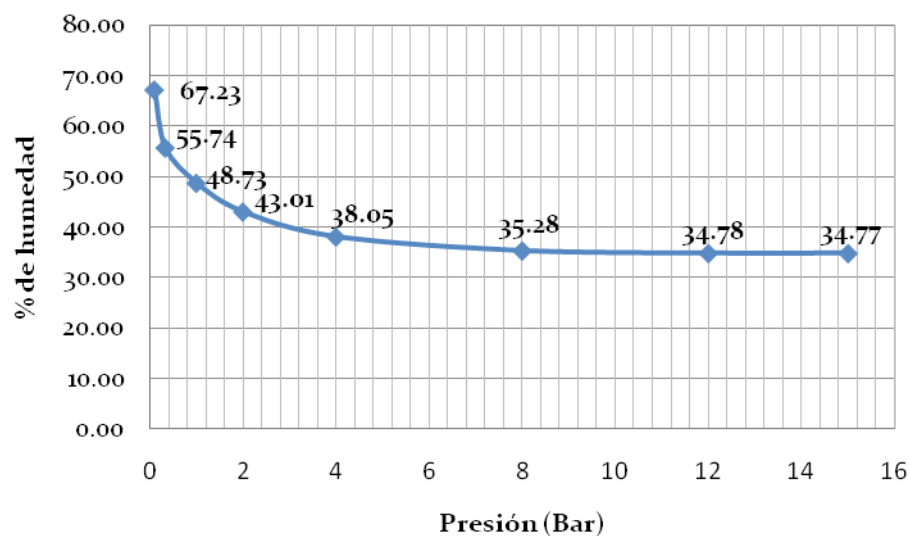


Figura A.13. Curva de retención de humedad para el PVE-5.

En el PVE-5 se observa que el suelo tiene una gran cantidad de arcillas expansibles 2:1 lo que potencialmente lo volvería un suelo impermeable, sin embargo por tratarse de un Regosol los cuales son suelo de poco desarrollo también posee una gran cantidad de gravas por lo tanto se le considera un suelo muy permeable.

Tabla A.1. Densidad real, densidad aparente y porosidad

No. Muestra	Dens. Real (gr/cm3)	Dens. Aparente (gr/cm3)	Porosidad %
PVE-1A	2.44	1.47	39.78
PVE-1B	2.23	1.45	34.87
PVE-2A	2.53	1.46	42.18
PVE-2B	2.74	1.41	48.31
PVE-3	2.44	1.44	41.19
PVE-4A	2.32	1.39	40.27
PVE-4B	2.74	1.56	42.85
PVE-5	2.27	1.40	38.47

Anexo 3. Lista de Acrónimos

Ce: Coeficiente de escurrimiento.

CNA: Comisión Nacional del Agua.

CRVP: Coeficiente de la Recarga Vertical Potencial.

DOF: Diario Oficial de la Federación

E: Escurrimiento.

EC: Estaciones Climatológicas.

ET: Evapotranspiración.

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

FAO: Food and Agriculture Organization.

FESHM: Finite Element Storm Hydrograph Model.

FVTM: Franja Volcánica Trans Mexicana.

HECHMS: Hydrologic Modeling System.

HRU: Hydrological Response Units.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

MC: Microcuenca.

MDE: Modelo Digital de Elevación.

NOM: Norma Oficial Mexicana.

P: Precipitación.

PAA: Precipitación Acumulada Anual.

PVE: Punto de Verificación Edafológico.

REPDA: Registro Público de Derechos de Agua.

RVP: Recarga Vertical Potencial.

SCG: Sistema de Coordenadas Geográficas.

SIG: Sistema de Información Geográfico.

SMN: Servicio Meteorológico Nacional.

TMA: Temperatura Media Anual.

WMS: Watershed Modeling System.

REFERENCIAS CITADAS

- Allan J.** Geology of the Colima and Zacoalco grabens, SW Mexico: late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt [Publicación periódica] // Geological Society of America Bulletin. - 1986. - Vol. Vol. 97. - págs. 473-485.
- Allen R. L.S. Pereira, Raes D., Smith M.** Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [Informe]. - Roma : FAO; Irrigation and Drainage, 1998.
- Atkinson P.M.** Geographical information science: geostatistics and uncertainty [Publicación periódica] // Progress in Physical Geography. - 1999. - N° 1 : Vol. Vol. 23. - págs. 134-142.
- Belmonte S. y Núñez, V** Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG [Publicación periódica] // Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica.. - 2006. - N°6. - págs. 15-27.
- Blackburn Mike, Hoskins Brian y Slingo Julia** Notes on the Meteorological Context of the UK Flooding in June and July 2007 [Informe]. - [s.l.] : Walker Institute for Climate System Research , 2007.
- Burrough P. & McDonnel, R.** Principles of Geographical Informations Systems [Libro]. - Reino Unido : Oxford Universiti Press, 1998.
- Carrera Hernández S.J. Gaskin** Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. [Publicación periódica] // Journal of Hydrology. - 2007. - N° 336. - págs. 231-249.
- Carrera Hernández S.J. Gaskin** Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico [Publicación periódica] // Journal of Hydrology (2008) 353, 228– 246. - 2008. - N° 353. - págs. 228– 246.
- Carter M.** Soil Sampling and Methods of Analysis [Libro]. - [s.l.] : Leweis Publishers, 1993.
- Choudhry S. Bardsley W.E., Morad M.** DEM errors and their effects on surface runoff modelling [Conferencia] // Proceedings of International Conference on Computer methods in Water Resources. - Líbano : [s.n.], 1997b.
- Choudhry S. Bardsley W.E., Morad M.** Rainfall-runoff modelling of Opuiaki river catchment, NZ using GIS [Conferencia] // Proceedings of International Conference on Water/Land. - Auckland, Nueva Zelanda : [s.n.], 1997a. - págs. 435-438.
- Chrisman N.** Exploring Geographical Information Systems [Libro]. - Chichester, Reino Unido : John Wiley and Son, 1997.
- Comisión Nacional del Agua** DETERMINACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ACUÍFERO AMECA, ESTADO DE JALISCO [Informe]. - Mexico D.F. : [s.n.], 2000.
- Comisión Nacional del Agua** Estadísticas del agua en México 2008 [Informe]. - México D.F. : Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
- Demant A.** Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano [Publicación periódica] // Revista Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. - 1981. - págs. 217-222.
- Díaz Martín** Geoestadística aplicada [Libro]. - México D.F. : Instituto de Geofísica, UNAM, 2002.
- Díaz Padilla Gabriel [y otros]** INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN PLUVIAL EN LA ZONA DE BARLOVENTO Y SOTAVENTO DEL GOLFO DE MÉXICO [Publicación periódica] // Agricultura Técnica en México. - 2008. - N° 3 : Vol. Vol. 34. - págs. 279-287.

- Díaz Ruiz, Medina Gabriel y Serrano A.V.** Estadísticas climáticas básicas del estado de Tabasco (período 1961-2003) [Informe]. - Cotaxtla. Veracruz, : INIFAP; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 2006.
- Dressler K. A. Fassnacht S. R., Bales, R. C. Davis, R. E. Lampkin, D. and Myers, D. E.** Geostatistical interpolation of point-measured SWE in the Colorado River Basin. [Publicación periódica] // EOS Transactions American Geophysical Union. - 2000. - pág. 397.
- ESRI** ESRI España [En línea]. - 2010. - Abril de 2010. - <http://www.esri.es/index.asp?pagina=1>.
- ESRI** What is ArcGIS 9.2? [Libro]. - New York USA : Environmental Systems Research Institute Inc., 2006.
- FAO** Base Referencial mundial del Recurso Suelo [Informe]. - 2007.
- FAO** Evapotranspiración del cultivo; Guías para la determinación de los requerimientos del agua en los cultivos [Informe]. - 1990.
- FAO** Manual Curso Análisis Espacial Arcview 8.2 [Informe]. - Santiago de Chile : FAO, 2003.
- FAO** Working paper. FAO, Bangkok, Tailandia [Informe]. - Bangkok, Tailandia, : Food and Agriculture Organization of United Nations, 1988.
- Flint Alan y Flint Lorraine** Physical Methods [Sección del libro] // Method of Soil Analysis / aut. libro Topp Dane and G.. - Madison, Wisconsin, USA : Soil Science Society of America, Inc., 2002.
- Gama-Castro J. Carreón-Freyre D., Palacios-Mayorga S. Solleiro Rebolledo E.** Génesis, identificación y usos de los suelos en México [Libro]. - México D.F. : Instituto Mexicano del Transporte. 203 pp., 1999.
- Garduño Monroy V., Spinner, J., Ceragioli, E.** Geological and structural study of the Chapala Rift, state of Jalisco, Mexico [Publicación periódica] // Geofísica Internacional. - 1993. - págs. 487-499..
- Gaytán Roberto José de Anda, Jim Nelson** Modificaciones en el régimen de escur r imiento en la cuenca del lago de Santa Ana (Zacatecas, México) [Publicación periódica]. - 2008.
- Geoex S.A. de C.V.** Geohidrológico Atemajac-Toluquilla [Informe]. - Guadalajara : Geoex S.A. de C.V., 2004.
- Giles Chapman M.A., Franklin S.E.** Incorporation of a digital elevation model derived from stereoscopic satellite imagery in automated terrain analysis [Publicación periódica] // Computers and Geoscience. - 1994. - Vol. Vol. 20. - págs. 441-460.
- Gill F. J. Martínez** Aspecto histórico y evolutivo de las ideas acerca de las aguas subterráneas desde los tiempos más remotos hasta el nacimiento de la Ciencia Hidrogeológica [En línea]. - 1972. - Enero de 2009. - <http://web.usal.es/~javisan/hidro/Complementos/historia.pdf>.
- Gobierno de Jalisco** Comision estatal del Agua de Jalisco [En línea]. - 2010. - Diciembre de 2009. - <http://www.ceajalisco.gob.mx/index.html>.
- Goovaerts P** [Publicación periódica] // Journal of Hydrology. - 2000. - N° 228. - págs. 113-129.
- Gracia C. A., S. Sabaté y A. Sánchez.** El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo [En línea]. - 2002. - Enero de 2009. - www.aeet.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm.
- GRID/UNEP** Global resource information database [Informe]. - Bangkok, Tailandia : United nations educational program, 1993.
- Halliday S. L. y Wolfe M.L.** Assessing Groundwater Pollution Potential from Agricultural Chemicals Using a GIS [Publicación periódica] // Proceedings of International Summer Meeting of the American Society of Agricultural Engineers. - 1990. - N° 3 : Vol. Vol. 25. - pág. 630.

- INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía [En línea]. - 2009. - junio de 2009. - <http://mapserver.inegi.org.mx/DescargaMDEWeb>.
- INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía [En línea]. - 2009. - Diciembre de 2009. - http://mapserver.inegi.org.mx/data/inf_e1m.
- INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía [En línea]. - 2010. - Febrero de 2010. - <http://mapserver.inegi.org.mx/geografia/espanol/estados/jal/geolo.cfm?c=444&e=13>.
- INEGI** Instituto Nacional de Estadística y Geografía [En línea]. - 2010. - Enero de 2010. - <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/soc/sis/sisept/default.aspx?t=mamb95&c=8486&e=>.
- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal** Enciclopedia de los Municipios de México [En línea]. - 2005. - Diciembre de 2009. - <http://www.e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/jalisco/mpios/municipios.htm>.
- Izquierdo T. y Márquez A.** Estudio comparativo de diferentes métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación en la isla de La Gomera (Islas Canarias): Evaluación de la incorporación de la altura [Publicación periódica] // Geogaceta. - Madrid : [s.n.], 2007. - N° 42.
- Johnson L.E., Dallman, J., Toms, E. Y Huffman, C.** Geographical Information System for Hydrological modelling [Publicación periódica] // Proceedings of the 3rd Water Resource Operations Management Division. - 1988. - págs. 736-749.
- Johnston K.M.** Natural resources modeling in the GIS environment [Publicación periódica] // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. - 1987. - Vol. Vol. 53. - págs. 1411-1415.
- Jones C.B.** Geographical Information Systems and Computer Cartography [Libro]. - Reino Unido : Addison Wesley Longman, Harlow, 1997.
- Klute A.** Water retention laboratory methods [Sección del libro] // Methods soil analysis. - 1986.
- Lloyd C.D.** [Publicación periódica] // Journal of Hydrology,. - 2005. - Vol. N° 308. - págs. 128-150.
- Maguire D.J.** An overview and definition of GIS [Sección del libro] // Geographical information systems: principles and applications. - Longman, Harlow, Reino Unido : Goodchild, M. F. y Rhind, D. W., 1991.
- Maidment D.R.** [Conferencia] // Proceedings of 3rd International Conference on GIS and environmental modelling. - New Mexico : GIS and hydrological modelling – an assessment of progress, 1996.
- Maidment D.R.** GIS and hydrological modeling [Sección del libro] // Environmental modelling with GIS / aut. libro Goodchild M.F.. - New York, USA : Parks, B.O. and Steyaert, L., 1993.
- Maldonado Sánchez** Caracterización Geoquímica del Campo Volcánico Acatlán, Jal [Publicación periódica] // Revista GeoCiencia del Servicio Geológico Mexicano. - 2007. - N° 2. - págs. 26-43.
- Mark D.M.** Spatial representation: a cognitive view [Sección del libro] // Geographical information systems: principles, techniques, management and applications / aut. libro Longley P., Maguire, D..J., Goodchild, M. F. y Rhind, D. W.. - Chichester, Reino Unido : John Wiley and Sons,, 1999.
- Martínez Pedro E. Matínez Pedro Santos** Fundamentos de hidrogeología [Libro]. - Madrid : Mundi-Prensa, 2006.
- Mendoza M. E. Bocco G., Bravo M.** Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research. [Publicación periódica] // Progress in Physical Geography.. - 2002. - págs. 319-338.

- Montaner Salas María Elena** Aproximación por el método de Thornthwaite, al cálculo de infiltración de lluvia útil [Publicación periódica] // Papeles de Geografía. - 1988. - págs. 223-225.
- Morad Munir y Perez Alejandro Triviño** Sistemas de Información Geográficos y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación [Publicación periódica] // Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles. N.º 31. - 2001. - págs. 23-46.
- Obregón Andría Juan Jose** El Krigeage [En línea]. - 2009. - <http://webs.uvigo.es/bastante/PDF/GEOESTADISTICA.pdf>.
- Olmedo Fransisco Gracia** El agua de nuestras vidas [Sección del libro] // El libro del Agua. - Barcelona : DEBATE, 2008.
- Rosas Elguera J., Urrutia-Fucugauchi, J** Tectonic control of the volcano sedimentary sequence of the Chapala graben, western Mexico [Publicación periódica] // International Geology Review. - 1998. - Vol. Vol. 40. - págs. 350-362.
- Rosier Barrera Fernando Zaragoza** Las estructuras del relieve del Estado de Jalisco [En línea]. - 2002. - Mayo de 2009. - <http://www.acude.udg.mx/jalisciencia/diagnostico/fisgeolsintes.pdf>.
- Sáenz Germán Monsanve** Hidrología en la Ingeniería [Libro]. - Bogota, Colombia : Alfaomega grupo editor, S.A. de C.V., 1999.
- Sánchez Morales Vicente** Características hidrofísicas de andosoles y Acrisoles y su funcionamiento en dos cuencas del estado de Michoacán [Libro]. - México D.F. : U.N.A.M., 2008.
- Secretaría de Función Pública** Diario Oficial de la Federación [Informe]. - México : [s.n.], 2001.
- Stube D.M. M.M. Johnston** Runoff Volume Estimation Using GIS Techniques [Publicación periódica] // Water Resources Bulletin. - 1990. - N.º 4 : Vol. Vol. 26. - págs. 611-620.
- Thauvin Helix J.P. (1975)** Repartición de la lluvia mensual en sus distintos componentes en el sureste español [Libro]. - Madrid : E.N. Andaro, 1975.
- Tuena Gomez Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L.,** Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana [Publicación periódica] // Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana,. - 2005. - N.º 3. - pág. 227.
- U.S.D.A - S.C.S.** Surge Flow Irrigation Field Guide [Libro]. - 1986.
- UJI** Universidad Jaume I. [En línea] // Lección 4. Evaporación y transpiración. - 2009. - Diciembre de 2009. - <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ17.pdf>.
- Universidad de Murcia** Formato Raster. Álgebra de mapas [En línea]. - 2010. - 2010. - http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_5.pdf.
- Voudouris K Th. Mavrommatis, and A. Antonakos** Hydrologic balance estimation using GIS in Korinthia prefecture, Greece. [Publicación periódica] // Advances in Science and Research. - 2007. - págs. 1-8.
- White D.** Grid Based Application of Runoff Curve Numbers [Publicación periódica] // Journal of Water Resources Planning and Management. - 1988. - Vol. Vol. 114. - págs. 601-612.
- Wolfe M.L. Neale C.M.U.** Input Data Development for a Distributed Parameter Hydrologic Model (FESHM) [Sección del libro] // Proceedings of the International Symposium on modelling in Agriculture, Forest and Range Land Hydrology. - Michigan, USA, : [s.n.], 1988.