



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE GEOCIENCIAS

**IMPACTO DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA RECARGA POTENCIAL
EN LA CUENCA LERMA-CHAPALA DURANTE EL PERÍODO 1995-2007.**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

PRESENTA

JOSÉ LUIS RODRÍGUEZ CABALLERO

TUTOR DE TESIS

DR. JAIME JESÚS CARRERA HERNÁNDEZ - Centro de Geociencias, UNAM

COMITÉ EVALUADOR:

Dr. Gilles Pierre Rene Levresse - Centro de Geociencias, UNAM
Dra. Penélope López Quiroz - Centro de Geociencias, UNAM
Dr. José Alfredo Ramos Leal - Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
Dr. Iván Morales Arredondo - Instituto de Geofísica, UNAM

COMITÉ EVALUADOR:

Dr. Jaime Jesús Carrera Hernández - Centro de Geociencias, UNAM
Dr. Gilles Pierre Rene Levresse - Centro de Geociencias, UNAM
Dra. Penélope López Quiroz - Centro de Geociencias, UNAM

Juriquilla, Querétaro, Julio de 2018, México.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Declaro conocer el código de ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, Plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencia a, las obras de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.”



Atentamente

José Luis Rodríguez Caballero

AGRADECIMIENTOS

Este documento va dedicado a mis padres, que me han enseñado lo más importante de la vida, brindándome valores, respeto y perseverancia, para cumplir mis metas, especialmente a mi padre que siempre confió en que saldría adelante, hasta los últimos días de su vida.

A mi esposa Jenny, que ha estado a mi lado en los mejores y peores momentos, siempre confiando en mí, y brindándome todo su apoyo. Quien junto con mi hija son los motores para salir adelante

A mi pequeña Sofía Tamarix, que es la razón que me motiva a prepararme mejor, para apoyarla con las dificultades de la vida, siempre tratando de ser un ejemplo para ella.

Al doctor Jaime Carrera, que quien es una persona que admiro y respeto, por tener una preparación excepcional y con gran generosidad por brindarme un poco de sus conocimientos, con el único interés de que aprenda.

Al doctor Gilles y la doctora Penélope, por brindarme su tiempo y sus consejos para llevar por mejor camino este trabajo.

ABSTRACT

In Mexico there is a high dependence on groundwater, which is why it is very important to know the recharge in order to have a better administration of this resource. The objective of this study was make a spatio-temporal analysis of precipitation, evapotranspiration and change of land use during the years 1995, 2001 and 2007 in the Lerma Chapala basin through the use of Geographic Information System. In addition to analyzing the change in land use and its effect on potential recharge, since, in previous works, the potential recharge was estimated as a percentage of precipitation (which is often considered uniform in the study area).

The basin has 48,129 km² of surface occupying part of the states of Jalisco, Michoacán de Ocampo, Mexico City, State of Mexico, Guanajuato and Querétaro.

For this work the GRASS GIS program was used to analyze information on temperature, precipitation, slope, land use and vegetation, edaphology, through which the annual aridity index, the annual runoff coefficient, the potential monthly evapotranspiration were obtained. the monthly runoff. The calculation of the potential recharge was made using a simple monthly standard balance, where the potential recharge is equal to the precipitation, minus evapotranspiration and runoff.

As a result it was found that recharge in the basin occurs mainly in the months of May to August. Being the year 1995 where the highest temperatures were had and for the 2007 the greater precipitations appeared. Obtaining that in 2007 a volume of 8,133 million cubic meters of recharge, followed by 2001 with 6,327 million cubic meters and obtaining the lowest recharge in the year of 1995 with 5,132 million cubic meters. The potential recharge at the basin level is not very affected by urban growth and land use change, being other factors that influence in greater measure such as precipitation and temperature.

RESUMEN

En México se tiene alta dependencia del agua subterránea, por lo cual es de gran importancia conocer la recarga para tener una mejor administración de este recurso. El objetivo de este estudio fue hacer un análisis espacio-temporal de la precipitación, la evapotranspiración y de cambio de uso de suelo durante los años 1995, 2001 y 2007 en la cuenca Lerma Chapala mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica. Además de analizar el cambio de uso de suelo y su efecto en la recarga potencial, ya que, en trabajos anteriores, la recarga potencial era estimada como un porcentaje de la precipitación (la cual muchas veces es considerada uniforme en la zona de estudio).

La cuenca tiene 48,129 km² de superficie ocupando parte de los estados de Jalisco, Michoacán de Ocampo, Ciudad de México, Estado de México, Guanajuato y Querétaro.

Para este trabajo se utilizó el programa GRASS GIS, para analizar información de temperatura, precipitación, pendiente, uso de suelo y vegetación, edafología, mediante los cuales se obtuvo el índice de aridez anual, el coeficiente de escurrimiento anual, la evapotranspiración potencial mensual y el escurrimiento mensual. El cálculo de la recarga potencial se realizó mediante un balance estándar simple mensual, donde la recarga potencial es igual a la precipitación, menos la evapotranspiración y el escurrimiento.

Como resultado se encontró que principalmente en los meses de mayo a agosto se presenta recarga en la cuenca. Siendo el año 1995 donde se tuvieron las mayores temperaturas y para el 2007 se presentaron las mayores precipitaciones. Obteniendo en el 2007 un volumen de 8,133 millones de metros cúbicos de recarga, seguido del 2001 con 6,327 Mm³ cúbicos y obteniendo la menor recarga en el año de 1995 con 5,132 Mm³. La recarga potencial a nivel de cuenca no se observa muy afectada por el crecimiento urbano y cambio de uso de suelo, siendo otros factores los que influyen en mayor medida como la precipitación y temperatura.

CONTENIDO

ABSTRACT.....	II
RESUMEN	V
AGRADECIMIENTOS	III
CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. REVISIÓN DE LITERATURA	2
3.1. <i>Recarga potencial</i>	3
3.1.1. <i>Factores que intervienen en la recarga</i>	3
3.2. <i>Sistemas de información geográfica</i>	4
3.3. <i>Modelo digital de elevación</i>	5
3.4. <i>Clasificación de la vegetación</i>	6
3.5. <i>Evapotranspiración</i>	7
3.6. <i>Precipitación y temperatura</i>	8
3.7. <i>Escurrimiento</i>	9
3.8. <i>Permeabilidad del suelo</i>	10
4. METODOLOGÍA	10
4.1. <i>Zona de estudio</i>	10
4.2. <i>Desarrollo socioeconómico de la cuenca Lerma-Chapala</i>	13
4.3. <i>Descripción de los programas utilizados</i>	16
4.4. <i>Sistemas de coordenadas</i>	17
4.5. <i>Procedimiento</i>	17
4.5.1. <i>Uso de suelo y vegetación</i>	19
4.5.2. <i>Edafología</i>	21
4.5.3. <i>Elevación</i>	25
4.5.4. <i>Precipitación y Temperatura</i>	28
4.6. <i>Modelo y fórmulas</i>	28
4.7. <i>Interpolación</i>	29
4.7.1. <i>Temperatura</i>	34
4.7.2. <i>Precipitación</i>	41
4.8. <i>Escurrimiento superficial</i>	50

4.9.	<i>Edafología</i>	52
4.10.	<i>Uso de suelo y vegetación</i>	54
5.	RESULTADOS	56
6.	CONCLUSIONES	70
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	TIPOS DE VEGETACIÓN DE MÉXICO. EQUIVALENCIAS APROXIMADAS ENTRE LOS TIPOS DE VEGETACIÓN USADOS POR DISTINTOS AUTORES (MODIFICADO DE RZEDOWSKI, 1988).	6
TABLA 2.	SUPERFICIES QUE CUBRE POR ESTADO LA CUENCA LERMA CHAPALA.....	12
TABLA 3.	IMPORTANCIA DE LAS GRANDES CIUDADES LOCALIZADAS EN LA CUENCA LERMA CHAPALA	14
TABLA 4.	VALOR DE CAPACIDAD DE AGUA DISPONIBLE.....	24
TABLA 5.	CANTIDAD DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONSULTADAS PARA TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN EN LOS AÑOS 1995, 2001 Y 2007.....	30
TABLA 6.	VALORES DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA CON LOS DIFERENTES FACTORES PARA LOS AÑOS 1995, 2001 Y 2007.....	34
TABLA 7.	VALORES DE CORRELACIÓN DE TEMPERATURA OBTENIDA POR VALIDACIÓN CRUZADA DE LA INTERPOLACIÓN CONTRA LOS VALORES REALES DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y ERROR MEDIO CUADRÁTICO RESULTADOS DE INTERPOLACIÓN.....	37
TABLA 8.	VALORES DE TEMPERATURA SUPERIORES AL PROMEDIO	41
	ANUAL DE ACUERDO AL MONITOREO DE NOAA EN °C.....	41
	(EN COLOR ROJO LOS VALORES MUY ALTOS Y EN AZUL LOS VALORES MUY BAJOS)	41
TABLA 9.	VALORES DE CORRELACIÓN DE PRECIPITACIÓN CON LOS DIFERENTES FACTORES PARA LOS AÑOS 1995, 2001 Y 2007.....	42
TABLA 10.	VALORES DE CORRELACIÓN DE PRECIPITACIÓN OBTENIDA POR VALIDACIÓN CRUZADA DE LA INTERPOLACIÓN CONTRA LOS VALORES REALES DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y ERROR MEDIO CUADRÁTICO RESULTADOS DE INTERPOLACIÓN.....	46
TABLA 11.	TABLA DE COEFICIENTES DE KENNESSEY	50
	(SPADONI ET AL. EN 2010 Y GHIGLIERI ET AL. EN 2014).....	50
TABLA 12.	TIPO DE SUELO Y PERMEABILIDAD AJUSTADO A COEFICIENTES DE KENNESSEY.....	53
TABLA 13.	RECLASIFICACIÓN DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN SEGÚN INEGI AJUSTADO A COEFICIENTES DE KENNESSEY.....	54
TABLA 14.	RESULTADOS DE ESCURRIMIENTO, PRECIPITACIÓN Y RECARGA POTENCIAL, EN MILLONES DE METROS CÚBICOS DE AGUA EN LA CUENCA.....	66
TABLA 15.	USO DE SUELO Y VEGETACIÓN EN LOS AÑOS DEL ESTUDIO, DE ACUERDO AL INEGI.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA LERMA CHAPALA EN EL TERRITORIO MEXICANO.....	11
FIG. 2. ELEVACIÓN DE LA CUENCA LERMA CHAPALA DE ACUERDO AL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN SRTM.	13
FIG. 3. DIAGRAMA DEL FLUJO DE TRABAJO.....	18
FIG. 4. MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN AGRUPANDO LOS TIPOS DE LA SERIE 2 (1995), SERIE 3 (2001) Y SERIE 4 (2007) DEL INEGI.	21
FIG. 5. CARTAS EDAFOLÓGICAS ESCALA 1 A 250,000 DE LA SERIE DE 2 DEL INEGI, USADAS PARA ABARCAR LA CUENCA LERMA CHAPALA.....	22
FIG. 6. EDAFOLOGÍA DE LA CUENCA LERMA CHAPALA.	23
FIG. 7. DISTRIBUCIÓN DE LAS IMÁGENES SRTM DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN QUE CUBREN LA CUENCA LERMA CHAPALA A RESOLUCIÓN DE 30M ²	26
FIG. 8. MÉTODO DE PROCEDIMIENTO DE FILTRADO DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (GRASS GIS)....	27
FIG. 9. DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DENTRO DE LA CUENCA LERMA CHAPALA.29	
FIG. 10. PARTES QUE COMPRENDEN EL SEMIVARIOGRAMA.	33
FIG. 11. GRÁFICA DE DISPERSIÓN DE VALORES DE TEMPERATURA CON RESPECTO A LA ELEVACIÓN (PUNTOS AZULES) Y LÍNEA DE TENDENCIA (LÍNEA ROJA) PARA EL AÑO 1995.....	35
FIG. 12. EJEMPLO DE GRAFICA DE SEMIVARIOGRAMA DE TEMPERATURA Y SEMIVARIOGRAMA TEÓRICO (LÍNEA CONTINUA).....	36
FIG. 13. VARIACIÓN ESPACIAL DE TEMPERATURA PARA EL AÑO 1997.	38
FIG. 14. VARIACIÓN ESPACIAL DE TEMPERATURA PARA EL AÑO 2001.	39
FIG. 15. VARIACIÓN ESPACIAL DE TEMPERATURA PARA EL AÑO 2007.	40
FIG. 16. DIFERENCIAS DE PRECIPITACIÓN POR ESTACIÓN METEOROLÓGICA. PARA EL MES DE AGOSTO DE 2001.....	43
FIG. 17. GRÁFICA DE DISPERSIÓN DE VALORES DE PRECIPITACIÓN CON RESPECTO A LA VARIABLE AUXILIAR (LÍNEAS AZULES) Y LÍNEA DE TENDENCIA (LÍNEA ROJA) PARA EL AÑO 1995.....	44
FIG. 18. EJEMPLO DE AJUSTE DE SEMIVARIOGRAMA DE PRECIPITACIÓN.....	45
FIG. 19. VARIACIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIÓN PARA EL AÑO 1995.....	47
FIG. 20. VARIACIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIÓN PARA EL AÑO 2001.....	48
FIG. 21. VARIACIÓN ESPACIAL DE PRECIPITACIÓN PARA EL AÑO 2007.....	49
FIG. 22. MAPA DE ÍNDICE DE ARIDEZ ANUAL.	52
FIG. 23. MAPA DE PENDIENTES DE ACUERDO AL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN SRTM.	55
FIG. 24. MAPAS DE COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL PARA EL 1995, 2001 Y 2007.....	56
FIG. 25. VARIACIÓN ESPACIAL DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL PARA EL AÑO 1995.....	57
FIG. 26. VARIACIÓN ESPACIAL DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL PARA EL AÑO 2001.....	58

FIG. 27. VARIACIÓN ESPACIAL DE ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL PARA EL AÑO 2007.....	59
FIG. 28. VARIACIÓN ESPACIAL DE EVAPOTRANSPIRACIÓN SUPERFICIAL PARA EL AÑO 1995.	60
FIG. 29. VARIACIÓN ESPACIAL DE EVAPOTRANSPIRACIÓN SUPERFICIAL PARA EL AÑO 2001.	61
FIG. 30. VARIACIÓN ESPACIAL DE EVAPOTRANSPIRACIÓN SUPERFICIAL PARA EL AÑO 2007.	62
FIG. 31. VARIACIÓN ESPACIAL DE RECARGA POTENCIAL PARA EL AÑO 1995.	63
FIG. 32. VARIACIÓN ESPACIAL DE RECARGA POTENCIAL PARA EL AÑO 2001.	64
FIG. 33. VARIACIÓN ESPACIAL DE RECARGA POTENCIAL PARA EL AÑO 2007.	65
FIG. 34. RESULTADOS ANUALES OBTENIDOS.....	68

1. INTRODUCCIÓN

México es un país con una alta dependencia del agua subterránea. En 2016, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tenía registrados 653 acuíferos, de los cuales 126 se encontraban sobre explotados. Lo anterior significa que en estos 126 acuíferos se extrae más agua de la que se recarga, ocasionando abatimiento de los niveles piezométricos de hasta 2.5 m por año en la Ciudad de México (Carrera-Hernández y Gaskin, 2007) y en la ciudad de Querétaro (Carrera-Hernández et al., 2016).

Para lograr disminuir los problemas asociados a las altas tasas de extracción en los acuíferos del país, es necesario estimar la recarga potencial a los acuíferos, por lo cual en este trabajo se adaptó una metodología para estimar la recarga potencial en una de las zonas más importantes del país: la cuenca Lerma-Chapala.

La metodología aplicada considera la variación espacio-temporal de la precipitación, la evapotranspiración y de cambio de uso de suelo durante los años 1995-2007 mediante el desarrollo de un programa en un Sistema de Información Geográfica. Esta es la principal aportación del presente trabajo, ya que, en trabajos realizados con anterioridad, la recarga potencial era estimada como un porcentaje de la precipitación (la cual muchas veces es considerada uniforme en la zona de estudio).

El análisis presentado primero se enfocó en determinar la recarga potencial en la Cuenca Lerma-Chapala para los años 1995, 2001 y 2007, para después estimar si los cambios de uso de suelo en la zona han disminuido la recarga potencial.

2. OBJETIVOS

1. Determinar la recarga potencial de agua subterránea en la cuenca Lerma-Chapala en los años 1995, 2001 y 2007

Para esto se llevó a cabo:

- a) Estandarización de la cartografía existente en diferentes formatos a un formato raster a 100 metros de resolución para realizar las operaciones matemáticas de álgebra de mapas.
 - b) Generación de la distribución espacio-temporal de la precipitación y temperatura para el área de estudio mediante interpolaciones con Kriging con deriva externa, a partir de datos de precipitación de estaciones meteorológicas localizadas en el área.
 - c) Cálculo de la evapotranspiración, escurrimiento y recarga potencial con ayuda de la cartografía existente y la cartografía generada.
2. Analizar el impacto del cambio de uso de suelo en la recarga potencial en la cuenca Lerma-Chapala durante los años 1995, 2001 y 2007.

Para lograr este objetivo, fueron necesarios los siguientes pasos:

- a) Obtención de la distribución espacio-temporal de la precipitación y la temperatura para los años 1995, 2001 y 2007
- b) Analizar el cambio de uso de suelo en el período mencionado
- c) Realización de un balance hídrico en el período mencionado.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

La estimación de la recarga de los acuíferos es necesaria para mejorar el manejo de los recursos hídricos, así como para estimar la dirección de flujos subterráneos tanto a nivel local como regional. En zonas semiáridas y áridas la variación de los eventos de recarga es muy importante, ya que cuando son estimados en períodos anuales la evapotranspiración excede la precipitación; sin embargo, en períodos cortos la precipitación puede exceder a la evapotranspiración, debido a lo cual se presenta recarga a los acuíferos en este tipo de climas.

La recarga se puede clasificar de acuerdo a su ocurrencia espacial: la recarga difusa es la que ocurre en áreas grandes debido a la precipitación o a láminas de riego en zonas de agricultura, mientras que la recarga localizada ocurre en depresiones topográficas (Scanlon et al., 2002).

La clasificación que se utiliza en este trabajo es la realizada por Lerner (1990), en la cual se tienen dos tipos de recarga: recarga actual, la cual consiste en la cantidad de agua que alcanza el nivel piezométrico y recarga potencial, la cual consiste en el agua disponible para convertirse en recarga, pero que dependiendo de ciertos factores (nivel piezométrico cercano a la superficie) se transforma en escurrimiento superficial.

En este trabajo se estimó la recarga potencial, la cual corresponde a recarga actual cuando los niveles piezométricos no son someros, como ocurre en gran parte de la zona de estudio.

3.1. Recarga potencial

Existe un gran número de métodos para estimar la recarga, entre los más conocidos se encuentran los balances hídricos de suelo, los métodos de regresión, los métodos de balance de masas de cloruro y el método Analítico (Meixner et al., 2016; Wilson y Guan, 2004; Cai y Offerdinger, 2016).

Ningún método existente para calcular la recarga hídrica está libre de errores, ya que su aplicación depende de muchos factores como tipo de suelo, vegetación, pendiente, así como la variación espacio-temporal de la precipitación y la evapotranspiración.

3.1.1. Factores que intervienen en la recarga

Debido a que existen varias metodologías para el cálculo de la recarga potencial, diferentes autores la han estimado de diferentes maneras. En el presente trabajo se aplicó la metodología desarrollada por Carrera-Hernández y Gaskin (2007), en la cual se considera la variación espacial de la vegetación y la topografía, así como la variación espacio-temporal de la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración. Estas variaciones son tomadas en cuenta mediante la realización de una serie de códigos de programación con instrucciones al

programa (scripts) en un Sistema de Información Geográfica (SIG) al utilizar un balance diario de agua en el suelo.

La vegetación tiene un fuerte efecto sobre la recarga del agua subterránea; de acuerdo a Kim y Jackson (2012), la vegetación explica el 24% de la variación global en la recarga. También es de gran importancia considerar los cambios que presenta la vegetación durante el tiempo de estudio (estado de senescencia), ya que esto tiene gran influencia temporal (de Vries y Simmers, 2002).

La mayoría de los modelos de estimación de recarga utilizan balances de humedad en el suelo, los cuales pueden realizarse mediante diferentes metodologías. Una de las metodologías más aplicadas es la descrita por la FAO en el estudio de riego y drenaje 56, evaporación de cultivo (Allen et al, 2006), la cual es la metodología que se aplicó en el presente trabajo.

3.2. Sistemas de información geográfica

Los sistemas de información geográfica (SIG) son una herramienta tecnológica que brinda alternativas para un sinnúmero de aplicaciones, principalmente en el estudio de ciencias de la tierra.

Los SIG, representan modelos geográficos del mundo real, definiendo fenómenos que se presentan en una región, con un rango de tiempo conocido y en un espacio definido por una localización exacta o relativa (Burrough y McDonnell, 1998). Del mismo modo los SIG son considerados sistemas de base computacional que sirven para estudiar fenómenos naturales o androgénicos con una localización geográfica determinada en el espacio, donde es posible la manipulación e introducción de datos que arrojan como resultado información del fenómeno de estudio (Huisman y De By, 2009; Neteler y Mitasova, 2008).

Los SIG fueron creados en la década de 60's con el objetivo de almacenar, recuperar, manipular, analizar y mapear datos espaciales geográficos, promoviendo la formación y desarrollo de esta disciplina científica para brindar apoyo en la toma de decisiones de los gobiernos como al público en general (Murayama, 2012).

Una de las principales funciones de los sistemas de información geográfica es modelar fenómenos naturales, para lo cual existen muchas alternativas dependiendo del fenómeno, sin embargo, el álgebra de mapas es la herramienta más eficiente, pues con esta es posible integrar información y procesarla, celda a celda (pixel) en formatos raster, haciendo operaciones matemáticas como trigonométricas, lógicas, exponencial, logaritmos, variables aleatorias, entre muchas otras (Escamilla, 2010).

El uso de los SIG facilita la investigación en superficies muy amplias, con grandes volúmenes de datos que sería imposible procesar de manera manual por lo cual son utilizados para diferentes temas brindando buenos resultados en el análisis de temas como localización de áreas de recarga, erosión y escurrimiento (Spadoni et al., 2010).

La diversidad de uso de los SIG, es muy amplia pero principalmente son utilizados para planeación urbana, estudios de fenómenos biológicos, análisis de riesgos o peligros naturales, ingeniería minera, geológica, manejo forestal e ingeniería hidrológica (Huisman y De By, 2009).

La información georreferenciada en los SIG puede representarse como raster o vector. En los modelos raster cada uno de los puntos espaciales está representado en una matriz, las cuales se utilizan para el manejo de datos continuos como la topografía. Por otro lado, el formato vectorial está diseñado para manipular objetos con más de un atributo que puede ser representado mediante puntos, líneas o polígonos y se utilizan para trabajar con datos discretos (Escamilla, 2010).

3.3. Modelo digital de elevación

Un modelo digital de elevación es un raster que presenta características en las tres dimensiones (x, y, z,) brindando la posibilidad de representar gráficamente una superficie del terreno (Huggel, 2008).

En México, el INEGI desarrolló el Continuo de Elevaciones de México (CEM) a partir de la interpolación de curvas de nivel. Debido a lo anterior, el CEM no representa de forma adecuada el terreno en regiones con poca pendiente.

Otros modelos digitales de elevación disponibles para el territorio mexicano son el Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) y el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). De estos dos modelos digitales de elevación, el SRTM presenta menor error de acuerdo a comparaciones realizadas por varios autores (Szabó et al., 2015; Huggel et al., 2008 y Nikolakopoulos et al., 20016). Por esta razón se utilizaron los datos SRTM, los cuales fueron descargados a una resolución de 30 metros y resampleados a 100 metros, que fue la resolución espacial a la cual se desarrolló el presente trabajo.

3.4. Clasificación de la vegetación

La vegetación cumple un papel fundamental en la cantidad de agua que se puede infiltrar al subsuelo. De acuerdo a Dugan y Peckenpaugh (1985), la vegetación influye en la recarga debido a la profundidad de raíces, consumo de agua y disminución del escurrimiento.

El proceso mediante el cual se afecta la infiltración de agua en el suelo causado por la vegetación lo describe Zhang et al., (1999) como la intercepción de lluvia por las hojas, reteniendo agua en las hojas que posteriormente escurre sobre el tallo hasta convertirse en escurrimiento sobre el árbol, reducción de la velocidad del agua al caer de las hojas al suelo y aumento de la superficie de evaporación por la presencia de agua en las hojas.

En un estudio de recarga global, Kim (2012) agrupó los diferentes tipos de vegetación en cinco categorías: tierras de cultivo, pastizales, bosque, monte bajo y sin vegetación. En el presente estudio, se utilizó la clasificación de Rzedowski (1988), quien agrupó la vegetación de la República Mexicana en 11 categorías (como se muestra en la Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de vegetación de México. Equivalencias aproximadas entre los tipos de vegetación usados por distintos autores (modificado de Rzedowski, 1988).

Rzedowski (1980)	Miranda y Hernández X.(1963)	Flores et al. (1971)
Bosque tropical perennifolio	Selva alta perennifolia, selva alta o mediana subperinnifolia	Selva alta perennifolia, subperinnifolia (en parte).
Bosque tropical subcaducifolio	Selva alta o mediana subcaducifolia	Selva mediana subcaducifolia , Selva mediana subperennifolia

Bosque tropical caducifolio	Selva baja caducifolia	Selva baja caducifolia (en parte)
Bosque espinoso	Selva baja subperennifolia (en parte), selva baja espinosa perennifolia y selva baja espinosa caducifolia.	Selva baja caducifolia (en parte), selva baja subperennifolia, mezquital (en parte).
Pastizal	Pastizal, zacatonales, vegetación de páramos de altura y sabanas.	Pastizal, zacatonal, sabana.
Matorral xerófilo	Matorral espinoso con espinas laterales; cardonales; tetecheras, etc.; izotales; nopaleras; matorral espinoso con espinas terminales; matorral inerme parvifolio; magueyales, lechuguillales, guapillales, etc; chaparrales, vegetación de desiertos áridos arenosos.	Mezquital (en parte) chaparral, matorral submontano, matorral crsicaule, matorral desértico rosetófilo, matorral desértico micrófilo.
Bosque de Quercus	Encinares	Bosque de encino
Bosque de coníferas	Pinares, bosque de abetos u oyameles.	Bosque de pino y bosque de oyamel
Bosque mesófilo de montaña	Selva median o baja perennifolia, bosque caducifolio (en parte).	Bosque caducifolio
Vegetación acuática y subacuática.	Manglar; popal; tulares, carrizales, etc.; bosque caducifolio (en parte).	Manglar, popal, tular y carrizal

3.5. Evapotranspiración

La evapotranspiración se origina como resultado de la suma de evaporación y de la transpiración, siendo la evaporación la forma en que el agua se convierte en vapor y es liberada a la superficie mediante el cambio de temperatura modificando la cohesión de las moléculas. La transpiración es un proceso similar que ocurre en las plantas mediante la liberación de vapor de agua por las estomas como resultado de la temperatura y el viento (Allen et al., 2006).

Las tasas de evapotranspiración dependen de la disponibilidad de humedad, además de la energía que existe para vaporizar la humedad y el viento para el transporte de la humedad en la atmósfera.

La evapotranspiración depende de muchos factores (Allen et al., 2006), como la irradiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento y de factores que están relacionados al tipo de cultivo o vegetación, como la etapa de desarrollo, altura, rugosidad, cobertura del suelo y características radiculares. Estos mismos factores pueden utilizarse cuando se habla de diferentes tipos de vegetación y no de cultivo. La evapotranspiración potencial representa la disponibilidad de energía y las condiciones del viento, pero no la disponibilidad de humedad (Niemann y Eltahir, 2004).

3.6. Precipitación y temperatura

La estimación de la variación espacio-temporal de la precipitación y la temperatura es necesaria para calcular la recarga de acuíferos. En México, los anticiclones subtropicales y las grandes elevaciones, además de la cercanía con los Océanos Atlántico y Pacífico tienen gran influencia en los tipos de climas del país, además de la circulación oeste de latitud media en invierno y el monzón norteamericano en verano (Andrew et al., 1999). A pesar de estas interacciones, la temporada de lluvias en el país generalmente es durante los meses de mayo a octubre (Giddings et al., 2005).

La temperatura del aire está determinada por la radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra, ejerciendo cierto control en la tasa de evapotranspiración. Por lo tanto, en días soleados y cálidos, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en días nublados y frescos (Allen et al., 2006).

En el suelo la temperatura influye en la parte superficial llegando a pocos centímetros de profundidad, sin embargo, los cambios de temperatura estacionales pueden llegar hasta los 20 metros de profundidad, influenciando con ello el flujo de vapor que también está determinado por la textura del suelo (Seiler y GAT, 2012).

La precipitación determina directamente la posibilidad de recarga, sin embargo, una lluvia fuerte no siempre se refiere a una cantidad mayor de agua infiltrada, por el contrario, una

lluvia media o débil, pero con una duración mayor pueden contribuir en mayor manera a la recarga (Seiler y GAT, 2012; Rushton et al., 2006). De esta manera la intensidad de la lluvia, la frecuencia y la distribución espacial determinan la recarga; sin embargo, estas son muy variables en las zonas áridas, semiáridas y también en los trópicos, pero son más constantes en climas polares, fríos y templados (Seiler y GAT, 2012).

3.7. Escurrimiento

El escurrimiento superficial es la parte de la precipitación que no logra infiltrarse en el suelo y por lo tanto no está disponible para el uso consuntivo del agua o la recarga de agua subterránea. Este factor está directamente relacionado con la permeabilidad del suelo, de la pendiente del suelo y la cubierta vegetal. Del mismo modo que la precipitación, puede expresarse en milímetros y se calcula como la precipitación menos la infiltración y evapotranspiración (Dugan y Peckenpaugh, 1985).

El escurrimiento es menor cuando la precipitación es escasa o nula, aumentando conforme la precipitación es mayor y más frecuente, debido a que, durante una precipitación baja, gran parte del agua es retenida en el suelo por la capacidad de agua disponible que puede mantenerse capturada en el suelo, la cual puede salir del suelo en forma de evapotranspiración, sin llegar a infiltrarse a la profundidad adecuada para ser parte de la recarga (Rushton et al. 2006).

El escurrimiento superficial está influenciado por varios componentes (Seiler y GAT, 2012) como son:

- Intensidades y duraciones de las lluvias.
- Geología de la cuenca.
- Uso de suelo y desarrollo de planta / cultivo.
- Espesor y funciones hidráulicas de la zona no saturada.
- Geometría del depósito e hidráulica.

3.8. Permeabilidad del suelo

La capacidad de agua disponible (AWC por sus siglas en inglés) es la capacidad de mantener el agua contenida en el suelo entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, siendo determinado por el tipo de suelo y la porosidad (Abel et al., 2013, Dugan y Peckenpaugh, 1985). Esto representa que en materiales de textura gruesa como la arena se tiene un valor bajo de AWC y las arcillas tienen el valor más alto.

Cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo no hay un movimiento de agua hacia el subsuelo, esto ocurre cuando el exceso de agua aplicada se ha drenado (Abrol y Bhumbra, 1969), también es llamada agua disponible para las plantas (PAW por sus siglas en inglés) de acuerdo a Asgarzadeh et al., (2014).

La capacidad de infiltración de agua en el suelo y sedimento se ve limitada por la compresión capilar o encogimiento, así como los polvos finos o costras químicas y microbianas, las cuales primero deben ser ensanchadas y posteriormente eliminadas, para mejorar la infiltración (Seiler y GAT, 2012).

4. Metodología

4.1. Zona de estudio.

La zona de estudio corresponde al área de la cuenca Lerma Chapala de acuerdo a los límites políticos establecidos por el INEGI. Dado que el objetivo del presente trabajo no fue comprobar los límites de la cuenca, se utilizaron los ya establecidos por las dependencias gubernamentales.

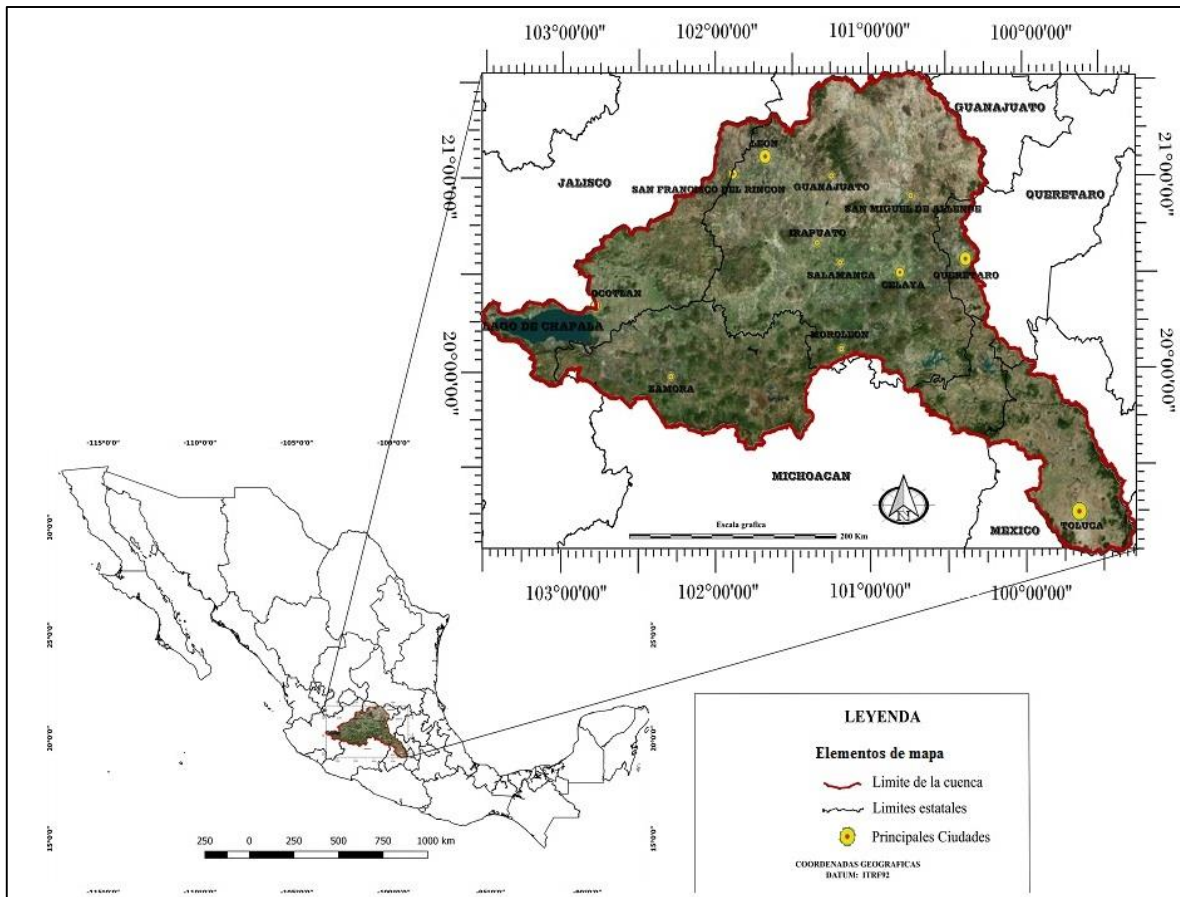


Fig. 1. Localización de la cuenca Lerma Chapala en el territorio mexicano.

La superficie del presente estudio es de 48,129 km² (figura 1) ocupando parte de los estados de Jalisco, Michoacán de Ocampo, Ciudad de México, Estado de México, Guanajuato y Querétaro con las superficies que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Superficies que cubre por estado la cuenca Lerma Chapala.

Entidad federativa	Superficie (km²)	Porcentaje de superficie del estado
Guanajuato	23,171.72	76.4
Jalisco	7,173.63	9.2
Edo. de México	5,263.34	23.7
Michoacán	11,028.58	18.9
Querétaro	1,490.33	12.9

La cuenca Lerma Chapala toma su nombre por el río Lerma que atraviesa completamente la cuenca con una longitud de 750 km, originándose en la meseta central de México, y desembocando en el lago de Chapala (Mestre, 1997; Durán y Torres, 2003).

La cuenca tiene una elevación mínima de 1,517 m s.n.m. y una máxima de 4,598 m s.n.m. como se puede observar en la figura 2. La mayor elevación se presenta cerca la ciudad de Toluca en el estado de México, mientras la parte más baja está ubicada en los Estados de Guadalajara y Michoacán.

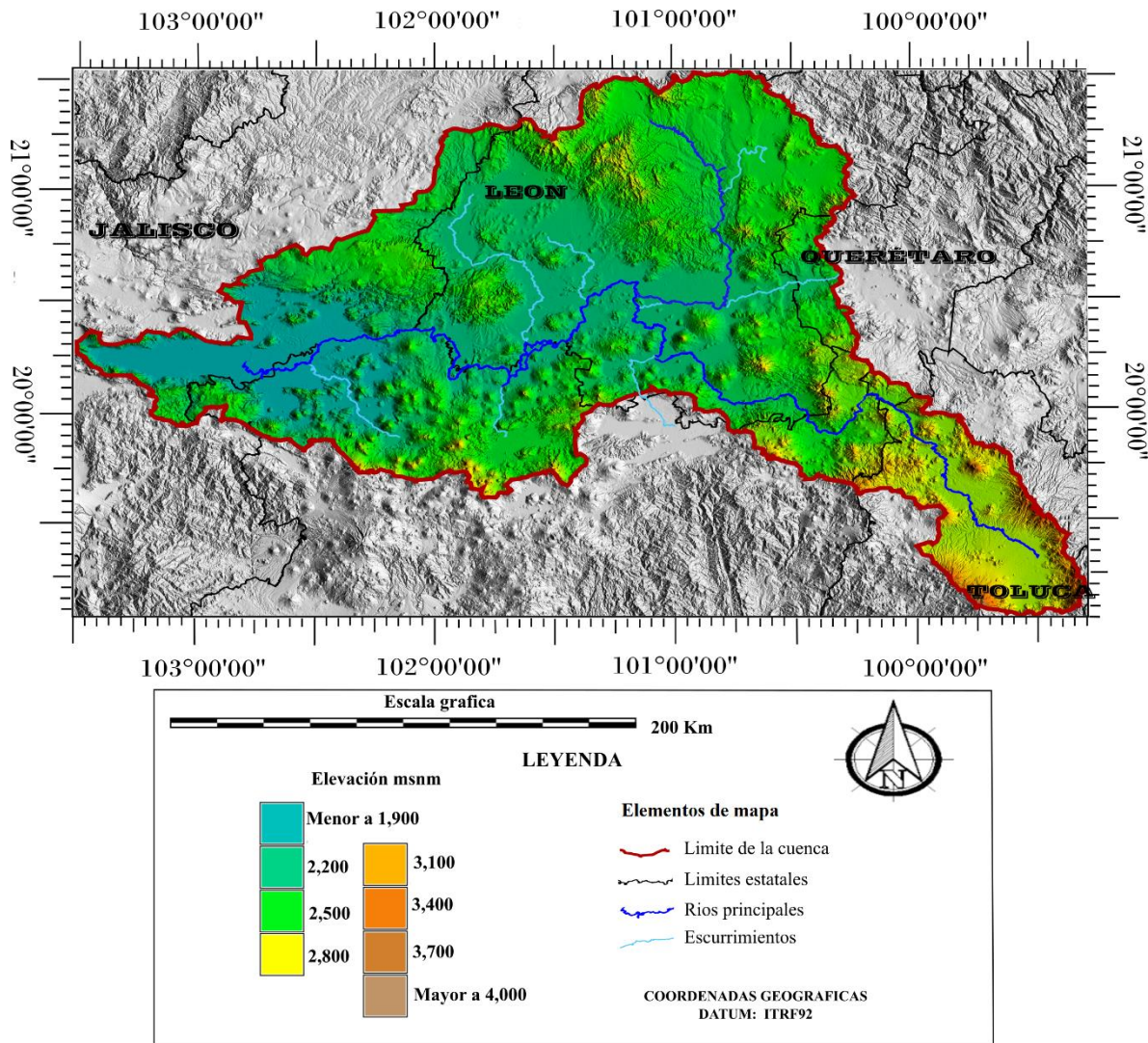


Fig. 2. Elevación de la cuenca Lerma Chapala de acuerdo al modelo digital de elevación SRTM.

4.2. Desarrollo socioeconómico de la cuenca Lerma-Chapala.

La cuenca Lerma Chapala ha tenido un crecimiento constante durante el siglo veinte, principalmente por el desarrollo social y económico, lo que ha ocasionado una necesidad mayor de agua por la perforación constante de pozos de extracción, pero reduciendo la superficie de recarga.

La CONAGUA y consultoras especializadas han realizado varios estudios para estimar los volúmenes de recarga. Sin embargo, estas estimaciones varían enormemente de acuerdo al autor y año de elaboración, por las metodologías aplicadas. Por esta razón surge la necesidad

de realizar un estudio con bases científicas que aporte valores realistas de acuerdo a las condiciones atmosféricas a menor escala.

El desarrollo económico, social y cultural de la cuenca Lerma Chapala fue influenciado en gran medida por el uso del agua del río Lerma, por lo que se han creado varias instituciones, durante el siglo XX, con el objetivo de promover obras de desarrollo en el área de la cuenca Lerma Chapala.

Las primeras grandes presas en la cuenca se establecieron durante la década de los 40's, como resultado de las fuertes sequías en ese periodo; sin embargo, durante los años 1950 a 1979 se realizaron la mayoría de ellas (Santos, 2004; Cotler y Gutiérrez, 2005). Actualmente, la cuenca cuenta con 552 presas y bordos con una extensión de 39 km², con un volumen concesionado de 2,036 Mm³, siendo el 11% del total de agua para la producción agrícola, ganadería y generación de energía (Cotler y Gutiérrez, 2005; CONAGUA, 2007).

Como resultado del desarrollo económico en la zona de estudio, se ha generado un crecimiento poblacional mayor en las ciudades cercanas, con un 20% del comercio nacional que se lleva a cabo dentro de la cuenca Lerma Chapala (Mestre, 1997), aportando al Producto Interno Bruto (PIB) cercano al 7%, el cual se distribuye de acuerdo a lo que se muestra en la Tabla 3 (INEGI 2014).

Tabla 3. Importancia de las grandes ciudades localizadas en la cuenca Lerma Chapala (INEGI 2014).

Ciudad	Población total	Porcentaje de Aportación al PIB
Toluca	1,936,124	2.3
León	1,609,504	1.9
Querétaro	1,097,025	1.9
Celaya	141,818	0.6
San Francisco del Rincón	49,005	0.1
Ocotlán	23,685	0.1

De acuerdo al censo del INEGI de 2010, la cuenca Lerma-Chapala cuenta con el 9% de la población total del país y una superficie de 2.4% del total de la superficie continental. Esto muestra que el área de estudio es una de las regiones más pobladas del país (Tabla 3), lo que representa una mayor disminución de la superficie para recarga y al mismo tiempo aumenta la cantidad de agua requerida, lo cual puede ocasionar la sobreexplotación de los acuíferos.

Se han tenido serios problemas debido a la tasa de consumo de agua que existe en la zona (Durán y Torres 2003), sobre todo por las sequías de los años 1999 y 2000, las cuales ocasionaron que el nivel de la laguna de Chapala disminuyera drásticamente en el 2001 (Scott et al., 2001; Durán y Torres 2003).

Actualmente, se estima que cerca de 26,000 pozos operan en la cuenca Lerma Chapala, sin embargo, existen muchos pozos que no están registrados (CONAGUA, 2012).

De acuerdo a la CONAGUA (2007) la recarga anual en la cuenca es de 4,126 millones de metros cúbicos (Mm^3), mientras que extracción es de 5,373 Mm^3 , lo cual implica que existe una sobreexplotación del 68% de los acuíferos de la cuenca. Así mismo, del total del agua subterránea extraída, el 76% ha sido utilizada para la irrigación de cultivos, siendo 3.7 veces más que el agua de escurrimientos superficiales, mientras que la industria utiliza más de siete veces el agua subterránea que el agua de escurrimiento superficial.

Levine (2007) menciona en un estudio realizado en 1999 por la Comisión Nacional del Agua en la Cuenca Lerma Chapala, que se tiene un volumen de escurrimiento de 5,757 Mm^3 y una recarga de 3,980 Mm^3 . En este mismo estudio se considera que del agua subterránea es utilizada para el consumo de la agricultura el 79%, un 19% tiene un uso urbano, 6% para la industria, 8% que es usada fuera de la cuenca y 4% tiene otros usos por lo cual se tiene un déficit de 16%.

Otro estudio realizado por la consultora Pladeyra (2000), considera que el agua que se infiltra dentro de la cuenca Lerma Chapala es mayor al 50% del agua que precipita en el área, llegando a ser más de 20,000 Mm^3 , mientras la evapotranspiración la considera de un 10% del total de agua precipitada y el escurrimiento es un 34%. En este estudio se dividió la cuenca en polígonos con características naturales similares, los cuales son la unidad de cálculo. Esto genera error, pues los polígonos son de gran tamaño y al realizar cálculos a este

nivel se generaliza mucha información, al utilizarse polígonos más pequeños, es más preciso el cálculo y la mejor forma de realizarlo, es utilizando cada pixel como unidad de cálculo.

4.3. Descripción de los programas utilizados

Para la realización de este trabajo se utilizó el Sistema de Información Geográfica denominado Geographic Resources Analysis Support System (GRASS), que surge entre los años 1982 y 1995, como programa libre de código abierto, con capacidad de procesar imágenes raster y modelos espaciales. Este programa fue creado por el laboratorio de ingeniería de recursos de construcción de la armada de Estados Unidos (USA-CERL) con fines científicos en Champaign, Illinois (GRASS GIS, 2017).

El programa GRASS GIS brinda la posibilidad de manejar grandes volúmenes de datos geoespaciales y llevar a cabo desde tareas sencillas hasta procesos complejos obteniendo excelentes resultados (Cobos, 2015), comprobado como uno de los mejores programas de sistemas de información geográfica para el cálculo de recarga potencial (Carrera y Gaskin, 2006).

Para manipular los vectores se utilizó el programa Qgis (Sherman 2007), los cuales fueron la base para poder realizar todas las capas que se encuentran en formato raster.

Otro de los programas que se utilizó fue el programa estadístico R, el cual es un conjunto integrado de programas para manipulación de bases de datos, cálculos y gráficos, donde es posible almacenar y manipular datos, teniendo una enorme cantidad de herramientas, además se complementó con diferentes paquetes (Team, 2000; Crawley, 2007).

El programa R fue elaborado como un proyecto GNU (sistema operativo libre en desarrollo, compatible con Unix) siendo un proyecto de software libre desarrollado en Bell Laboratories (anteriormente AT & T, ahora Lucent Technologies) por John Chambers y colegas (R Development Core Team, 2017).

Para realizar los análisis estadísticos se utilizó el paquete “gstat”, como complemento del programa R, el cual fue la herramienta para la realización de los kriging por los mejores resultados que se generan (Carrera y Gaskin, 2007 y 2008).

La principal ventaja de usar el programa de R y GRASS GIS es que se manejan mediante una interfaz conjunta para analizar los datos de temperatura y precipitación de las estaciones meteorológicas consultadas para los 3 años del estudio.

Otro de los programas utilizados fue Sublime Text 3 en su versión libre para la elaboración de los scripts, que es un programa de editor de código que facilita la elaboración de muchas actividades, automatizando gran parte del trabajo (Sublime Text development team, 2017).

4.4. Sistemas de coordenadas

El sistema de coordenadas es la representación de la superficie de la tierra de una manera geométrica plana, ya que la forma real de la tierra presenta deformaciones constantes, para esto se utilizan varias líneas de meridianos y paralelos con el fin de definir de manera precisa un punto (CENAPRED, 2004). La información utilizada se encontró en diferentes sistemas de coordenadas de acuerdo a la fuente que lo distribuye.

Una de las proyecciones más utilizadas en México es la UTM, la cual divide al globo terráqueo en 60 zonas, disminuyendo la distorsión de la superficie hacia el ecuador y aumentando de acuerdo a la cercanía de los polos (Escamilla, 2010; Bolstad, 2005).

Sin embargo, en este estudio se utilizó la proyección Conforme Cónica de Lambert (CCL) por representar una distorsión mínima, generando distancias verdaderas a lo largo de los paralelos estándar, además de mantener las direcciones más precisas (Escamilla, 2010).

4.5. Procedimiento

Para realizar este estudio fue necesario tener información primaria la cual se obtuvo en formato de vector, raster e información puntual en texto. Esta información obtenida de diferentes fuentes se homogeneizó para poder realizar los cálculos, en formato raster mediante algebra de mapas con el programa Grass Gis.

De este modo se obtuvo la información necesaria en formato raster de índice de aridez anual, el coeficiente de escurrimiento anual, la evapotranspiración potencial mensual y el

escurrimiento mensual, como se observa en la figura 3. Con esta información y la realización del proceso se obtuvo la recarga potencial.

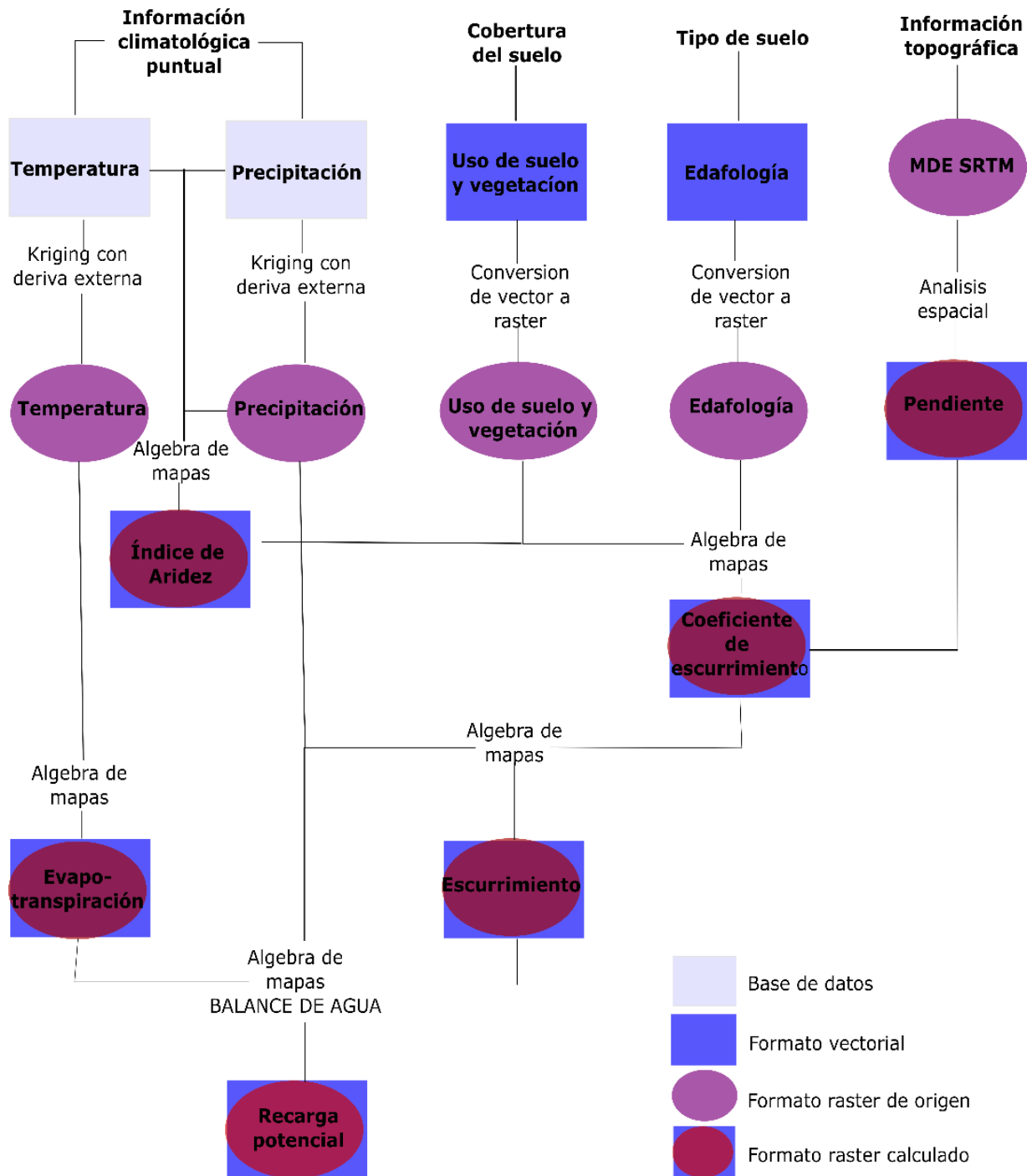


Fig. 3. Diagrama del flujo de trabajo.

4.5.1. Uso de suelo y vegetación

Para el estudio se utilizaron mapas de uso de suelo y vegetación del INEGI de la serie dos, tres y cuatro del continuo nacional en formato SHP con una escala de 1: 250,000 los cuales fueron descargados del portal CONABIO (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>), que contenían información con periodos de cada 6 años para 1995, 2001, y 2007:

- Serie II (dos) fue publicado por el INEGI en 2001, obteniendo información actualizada de uso del suelo y vegetación de la década de los años 90, el cual fue obtenido mediante un mosaico de mapas elaborados desde la década de los ochentas hasta los noventas y posteriormente actualizada mediante imágenes satelitales.
- Serie III (tres) fue publicado por el INEGI en 2005, obteniendo información de uso del suelo y vegetación, obtenida a partir de la interpretación tradicional de imágenes Landsat ETM de los años 2000 y 2002, y respaldada con trabajos de campo de 2002 y 2003.
- Serie IV (cuatro) fue publicado por el INEGI en 2009, obteniendo información del Uso del Suelo y Vegetación obtenida a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes de satélite Spot de los periodos estacionales de primavera y otoño de 2007 y escenas complementarias de la primavera del año 2008. Esta interpretación está apoyada con trabajos de campo realizado en otoño de 2007 y primavera-verano de 2008.

Como podemos observar no fue posible considerar una separación temporal bien definida por periodos continuos, debido a que la elaboración de cartografía de uso de suelo y vegetación se presentó de manera aleatoria en el tiempo. La serie uno y la serie dos abarcan periodos de aproximadamente 10 años, mientras que las series subsecuentes fueron elaboradas con períodos de 3 a 5 años, siendo la ultima la serie cinco publicada en 2013, con información de 2011.

Debido a lo anterior, se consideraron los años 1995, 2001 y 2007 de los cuales se obtuvieron los archivos shapefile (shp) en formato de polígonos vectoriales, posteriormente se convirtieron de formato vectorial a formato raster con una resolución de 100 metros.

Una vez que se convirtieron los mapas de uso de suelo y vegetación a formato raster, estos presentaban polígonos separados para cada categoría de uso de suelo y vegetación (170 clases para la serie 2, 175 clases para la serie 3 y 176 clases para la serie 4), por lo cual se unieron todas las clases para obtener un mapa completo en formato raster para cada una de las series, posteriormente se reclasificó en sólo 17 clases para una mejor manipulación, como se observa en la figura 4.

De acuerdo a los mapas obtenidos del área de estudio se puede observar que el principal uso de suelo es agrícola de temporal y agrícola de riego por la superficie en que se presenta, mientras el tipo de vegetación más abundante en el área es el bosque de encino y de coníferas, sin embargo, también hay presencia de matorral en algunas áreas.

Las áreas agrícolas han aumentado desde el 1995 al 2007, cambiando el uso de suelo de forestal a parcelas de cultivos, principalmente en las áreas cercanas a pueblos y ciudades de la cuenca.

Se puede observar en la secuencia de los mapas el crecimiento de las áreas urbanas desde 1995 hasta el 2007, sobre todo en las ciudades de Querétaro, Toluca, Celaya y León, mientras el crecimiento en las ciudades más pequeñas no ha sido tan notorio.

En cuanto a los cuerpos de agua como presas y lagos, en cada uno de los años se puede observar (figura 4) una diferencia poco significativa, aunque llama la atención que para la serie tres de uso de suelo y vegetación del INEGI el lago de Chapala, se ve considerablemente reducido en comparación con la información de la serie dos, debido a que del 2001 al 2003 el lago alcanzó un nivel muy bajo, encontrándose en la cota más baja desde 1955 (CEA, 2017; Durán y Torres, 2003), causado por la sequía de los años 1999 y 2000 (Scott y Ochoa, 2001), mientras que en la serie cuatro el lago vuelve a mantener sus dimensiones normales, aun que el volumen de agua real puede verse disminuido por el azolve que presenta (Wester et al., 2001).

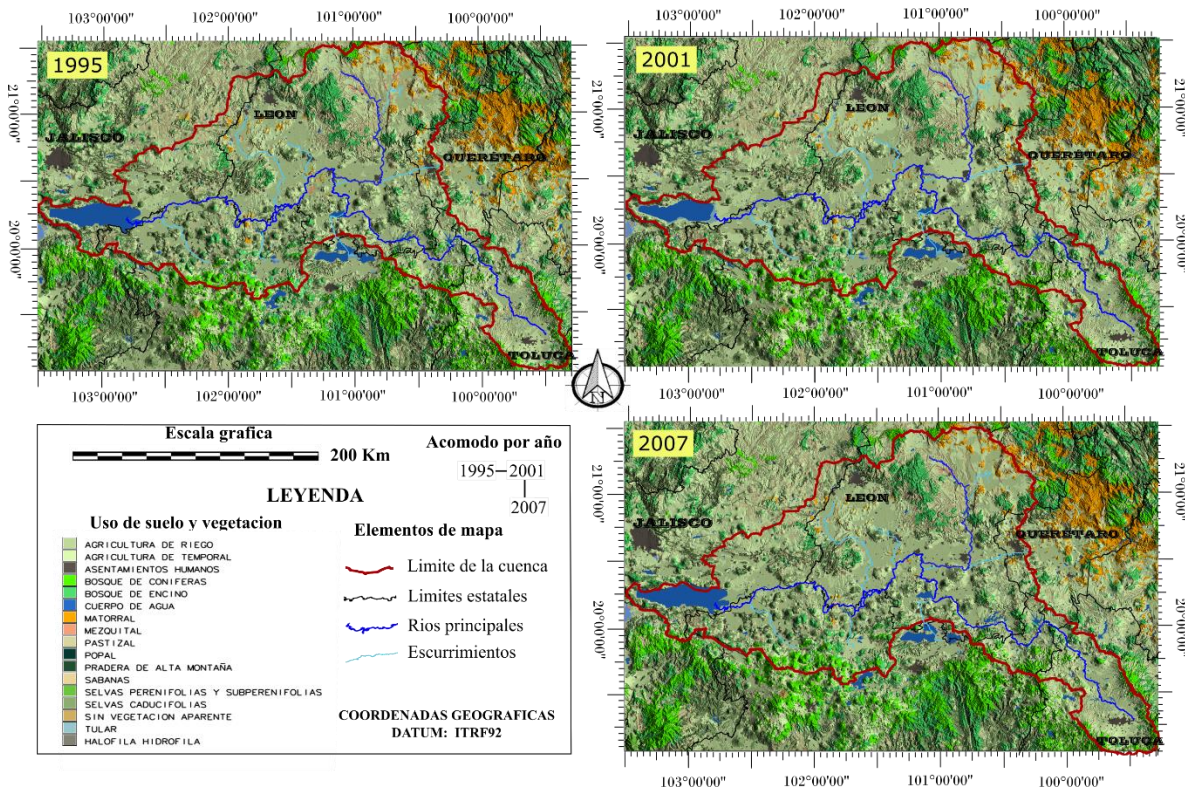


Fig. 4. Mapa de uso de suelo y vegetación agrupando los tipos de la serie 2 (1995), serie 3 (2001) y serie 4 (2007) del INEGI.

4.5.2. Edafología

Para el análisis de la edafología se utilizaron nueve cartas edafológicas de INEGI de la serie 2, obtenidas mediante datos de campo del 2002 al 2006 (figura 5), estas cartas se encuentran a una escala de 1:250,000 y se descargan en formato vectorial.

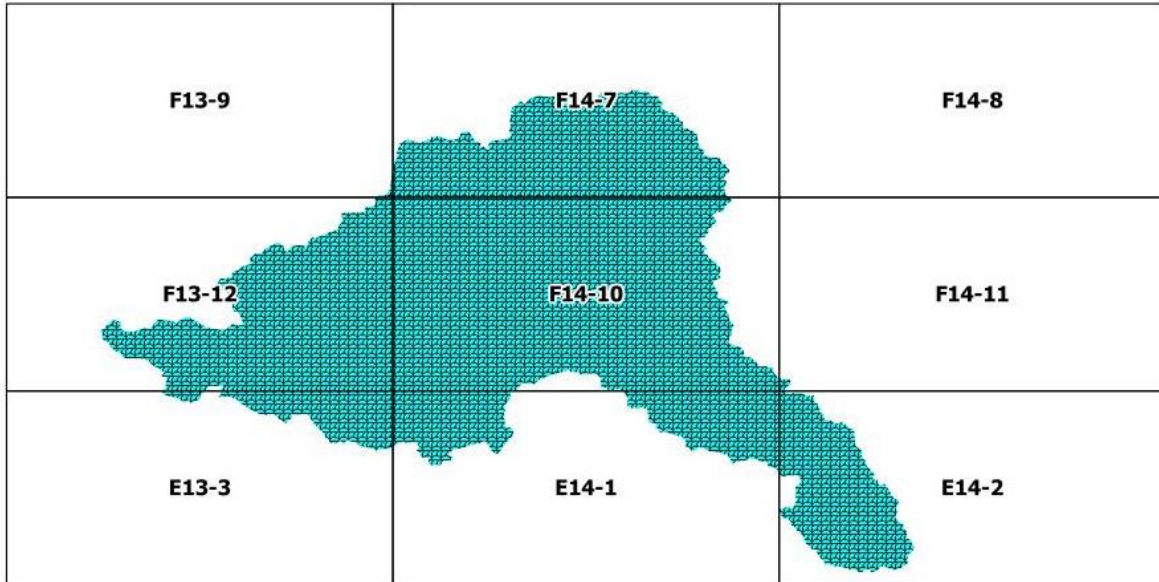


Fig. 5. Cartas edafológicas escala 1 a 250,000 de la serie de 2 del INEGI, usadas para abarcar la cuenca Lerma Chapala.

El mapa vectorial de edafología tiene 26 categorías para la zona de estudio, las cuales están clasificadas de acuerdo al sistema internacional base referencial mundial del recurso suelo (WRB por sus siglas en ingles World Reference Base for Soil Resources WRB).

Se utilizó el programa GRASS GIS para desplegar cada uno de los vectores, los cuales fueron descargados de la página del INEGI en un sistema de proyección Universal Transversal de Mercator (UTM). Para México se utilizan 6 zonas, desde la 11 a la 16 norte, por lo cual se tuvieron que re proyectar al sistema de coordenadas Conforme Cónica de Lambert (CCL).

Una vez que las cartas fueron descargadas y re proyectadas, se convirtieron los polígonos de acuerdo a la categoría en formato raster con una resolución de 100 m, con lo cual se obtuvieron 234 polígonos en total.

Una vez obtenido el mapa de tipo de suelo se definió una tabla de colores correspondiente a las unidades edafológicas (Figura 6).

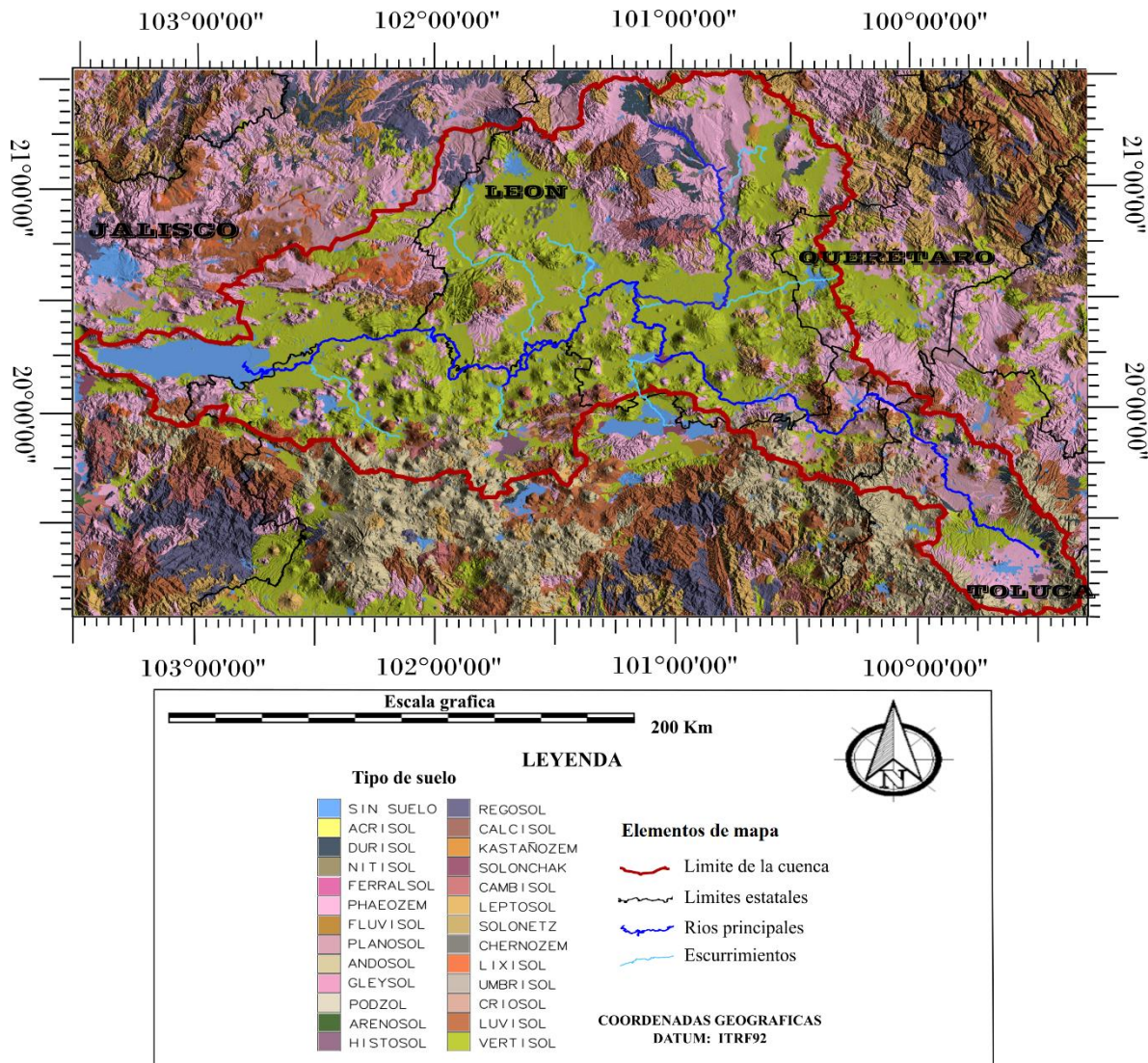


Fig. 6. Edafología de la cuenca Lerma Chapala.

Los principales suelos presentes en el área de estudio son el vertisol, luvisol, andosol y planosol, también se encuentran otros 21 tipos de suelo, aunque cubren áreas muy pequeñas. Las características de los principales suelos son (INEGI, 2004):

- Los vertisoles son suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. Puede presentar desde selvas bajas a pastizales y matorrales.
- Los Luvisoles son suelos con acumulación de arcilla, principalmente en zonas templadas o tropicales lluviosas.

- Los Andosoles son suelos de origen volcánico, constituidos principalmente de ceniza, con alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo, con alta capacidad de retención de humedad, en condiciones naturales.
- Los Planosoles son suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie. Son medianamente profundos en su mayoría, entre 50 y 100 cm, y se encuentran principalmente en los climas templados y semiáridos de nuestro país.

El tipo de suelo determina la capacidad de agua disponible al estar directamente relacionada con el tamaño de las partículas del suelo (Batjes, 1996; Wenzuo et al., 2005), por el contrario, la tasa de infiltración es inversamente proporcional a la capacidad de agua disponible (Waller y Yitayew, 2015).

De acuerdo al tipo de suelo se obtuvieron las capacidades de agua disponible, con esto se determinó la permeabilidad de cada unidad edafológica (Tabla 4), sin embargo, se consideró que cuando no se presenta suelo debe ser una cobertura impermeable como concreto, pavimento, acumulación de agua, etc.

Tabla 4. Valor de capacidad de agua disponible.

TIPO DE SUELO	CAPACIDAD DE AGUA DISPONIBLE
ARENOSOL	44
LIXISOL	50
FERRALSOL	65
LUVISOL	78
NITISOL	79
DURISOL	98
CHERNOZEM	100
REGOSOL	102
UMBRISOL	103

ACRISOL	104
PODZOL	105
FLUVISOL	105
SOLONETZ	105
PHAEOZEM	117
LEPTOSOL	119
KASTAÑOZEM	119
GLEYSOL	122
SOLONCHAK	125
CAMBISOL	125
VERTISOL	130
PLANOSOL	135
ANDOSOL	174
CALCISOL	190
HISTOSOL	193

4.5.3. Elevación

En cuanto a la información topográfica se utilizó el modelo digital de elevación (MDE) para obtener la pendiente, la cual es determinante para el cálculo del escurrimiento, considerando que al presentar una mayor pendiente, menor es el volumen de agua infiltrado.

En este trabajo se utilizaron imágenes raster en formato TIFF (Tagged Image File Format) del modelo digital de elevación del sensor SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) con una resolución de un 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m por 30 m) donde cada imagen raster cubre un grado cuadrado con error menor a 20 m (Tom et al., 2008).

Estos modelos digitales de elevación fueron descargados de la página Earthexplorer del Servicio Geológico de los Estado Unidos. Para cubrir el área de estudio se descargaron 15

imágenes DEM SRTM como se observa en la imagen figura 7, las cuales se desplegaron en el programa GRASS para ser manipuladas con una resolución de 30 metros por pixel.

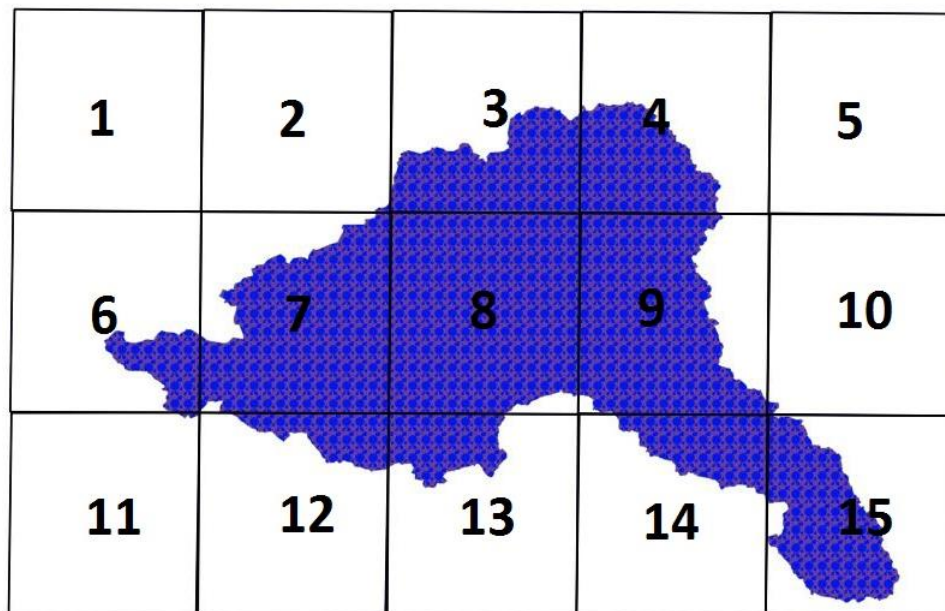


Fig. 7. Distribución de las imágenes SRTM del Modelo digital de elevación que cubren la cuenca Lerma Chapala a resolución de 30m x 30m.

Una vez que en el programa GRASS GIS se tuvieron cargados todos los MDE fue necesario unirlos, para obtener una sola imagen raster, con la información de elevación de toda la cuenca, generando una sola imagen para toda el área, en esta etapa se trabajó con una resolución de 30 metros por pixel.

Los MDE de SRTM pueden tener problemas por tener vacíos en la imagen, causado principalmente porque el radar no logra percibir señal por las condiciones del terreno (Tom et al., 2008). Debido a esta situación una vez que se tenía cargado en el programa el raster de los MDE unidos, fue necesario rellenar aquellos huecos en el programa GRASS GIS, generando valores de elevación para las áreas vacías para poder trabajarlo.

Cuando se obtienen los MDE se genera ruido principalmente por la vegetación, infraestructura y cualquier artefacto pequeño que cambia drásticamente la elevación, observándose pequeñas protuberancias en toda la superficie, por esta razón fue necesario realizar un procedimiento de filtrado mediante el comando “r.neighbors” a través del

promedio, con este procedimiento se observa cada celda del MDE original y examina los valores asignados a las celdas a su alrededor, produciendo una nueva capa de mapa ráster en la que se asigna a cada célula un valor promedio, para este caso se utilizó una superficie (vecindario) de cinco por cinco celdas (figura 8).

datos originales	operacion	resultado
<pre> +---+---+---+ 7 7 5 +---+---+---+ 4 7 4 +---+---+---+ 7 6 4 +---+---+---+ </pre>	<p>Promedio ></p>	<pre> +---+---+---+ +---+---+---+ 6 +---+---+---+ +---+---+---+ </pre>

Fig. 8. Método de procedimiento de filtrado del modelo digital de elevación (GRASS GIS).

Una vez realizado el filtrado, se obtuvo un MDE más homogéneo, el cual mantiene un valor menos afectado por el ruido, pero perdiendo precisión. Sin embargo, es adecuado para el análisis por la resolución que se maneja en el estudio.

La resolución del raster del MDE hasta esta etapa se manejó a 30 metros por pixel, para mantener la mayor precisión posible, sin embargo para el análisis de algebra de mapas es necesario que cada uno de los raster mantengan el mismo tamaño de pixel, por lo cual fue necesario hacer un aumento del tamaño del pixel mediante el comando “r.resample” de GRASS GIS, haciendo cada pixel de 100m por lado.

En este trabajo el MDE cumple con dos funciones relacionadas, una fue utilizarlo para calcular la pendiente, pues el escurrimiento esta reaccionado a este factor, la otra función fue crear un relieve sombreado para elaborar una representación gráfica más realista de los mapas.

La pendiente se calculó utilizando el programa GRASS GIS con el comando “r.slope.aspect”, el cual genero un mapa de pendiente en grados de inclinación desde el eje horizontal, siendo este raster uno de los más importantes para el cálculo de escurrimiento y de recarga potencial.

Por otro lado se creó el mapa de relieve sombreado mediante el comando “r.relief”, poniendo una altura del sol de 30 grados sobre el eje horizontal, y a 270 grados de azimut, con una exageración del relieve de 7 veces para observar mejor las elevaciones de la cuenca.

4.5.4. Precipitación y Temperatura

Para obtener la distribución espacio-temporal de precipitación y temperatura se utilizó la técnica del kriging, la cual busca poder predecir los patrones de comportamiento de los valores de manera espacial, mediante una serie de valores conocidos de estaciones meteorológicas, el cual fue aplicado por Carrera y Gaskin (2007) en la cuenca del valle de México.

4.6. Modelo y fórmulas

Los modelos hidrológicos tratan de predecir el comportamiento de acuerdo a las características del uso de suelo y comportamiento del clima, considerando los balances de humedad, niveles de agua subterránea y consideraciones topográficas (Dingman, 2002). Estos modelos pueden ser de varios tipos:

- Físicos; es la representación de una porción de los procesos naturales que ocurren en el mundo,
- Análogos; es la representación de un fenómeno físico a pequeña escala
- Matemáticos; es la representación de un fenómeno mediante métodos numéricos.

Dentro de este estudio se realizó un modelo de flujo de recarga de agua subterránea utilizando una gran cantidad de información, considerando la presencia regional del acuífero, además de tomar en cuenta el tipo de uso de suelo y vegetación, así como el cambio en el tiempo, junto con la topografía, y por último conjuntando todo esto con las variables climatológicas como temperatura y precipitación (Carrera y Gaskin, 2007; Walton, 1965).

Para calcular el escurrimiento se utilizó el método Kennessey, por brindar un buen resultado en áreas muy extensas y para periodos de análisis largos, aunque en superficies pequeñas y periodos de tiempo cortos pueden generar un mayor error (Ghiglieri et al., 2014).

El cálculo de la recarga potencial se realizó mediante un balance estándar simple mensual, debido a que se ajustó de una mejor manera a la información disponible en el área de estudio, siendo este procedimiento muy aceptado para estos cálculos por la comunidad científica que estudia la recarga (Carrera et al., 2016; Spadoni et al., 2010 y Robinson, 1992).

$$RP = PP - EPT - E \quad (1)$$

Para estimar la evapotranspiración se usó la ecuación de fórmula de Malmström (Malmström, 1969; Dingman, 2002):

$$ETP = 40.9 \times 0.611e^{\left(\frac{17.3T}{T + 237.3}\right)} \quad (2)$$

Donde EPT es la evaporación potencial con valores de milímetros por mes (*mm/mes*) y *T* es la temperatura media en grados centígrados ($^{\circ}C$).

4.7. Interpolación

Para realizar los análisis de información climática se utilizó el software ERIC III (Extractor Rápido de Información Climatológica), distribuido por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con información obtenida de 5,272 estaciones meteorológicas distribuidas en toda la extensión del territorio mexicano.

Para este trabajo se utilizó información de los años 1995, 2001 y 2007, sin embargo, mientras más recientes son los datos, es menor el número de estaciones encontradas.

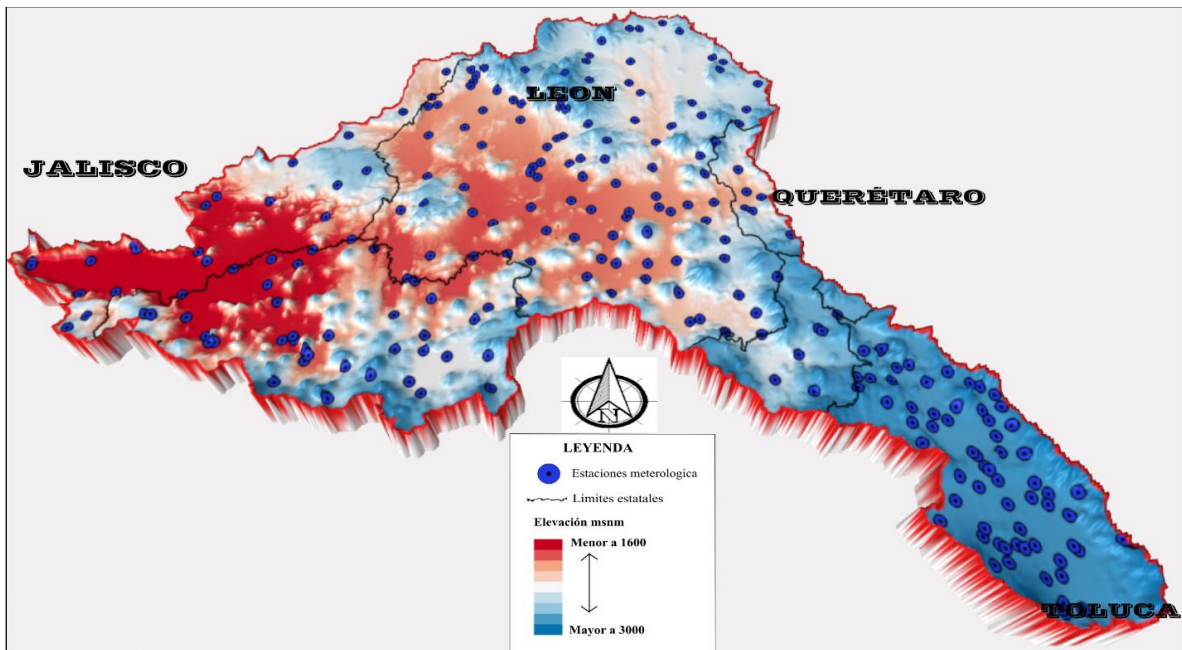


Fig. 9. Distribución de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca Lerma Chapala.

Para la temperatura solo se disponía de 405 estaciones durante el 1995, mientras que en 2001 solo 416 tenían datos y para 2007 el número de estaciones que brindó información fue de 332. La distribución fue uniforme en toda la superficie de trabajo como se observa en la figura 9.

Por otro lado, para precipitación se observaron 441 estaciones con datos durante 1995, así como 420 para 2001 y 339 para 2007. A pesar de la cantidad de estaciones meteorológicas con datos, no todos los meses presentaron la información requerida, ya que algunos meses aparece información “NO_D”, lo cual indica que no se dispone información para ese mes en específico, por esta razón se sustituyeron por “NA” para poder ser identificados por el programa R y omitidos. En la tabla 5 se indica el número de datos por mes, por año y por variable que si presenta un valor real.

Tabla 5. Cantidad de estaciones meteorológicas consultadas para temperatura y precipitación en los años 1995, 2001 y 2007.

MES	TEMPERATURA			PRECIPITACIÓN		
	1995	2001	2007	1995	2001	2007
ENERO	375	377	312	408	382	318
FEBRERO	381	384	313	415	389	319
MARZO	378	381	305	412	388	313
ABRIL	379	385	304	409	392	312
MAYO	375	389	308	404	395	315
JUNIO	381	381	308	405	387	315
JULIO	379	376	301	407	385	307
AGOSTO	383	379	394	413	388	299
SEPTIEMBRE	372	374	285	403	384	291
OCTUBRE	378	377	285	412	387	292
NOVIEMBRE	378	373	277	412	382	283
DICIEMBRE	375	368	269	407	378	276

La información de interés descargada de ERIC III que se analizó fue aquella que tenía la clave, latitud, longitud, año e información de temperatura y precipitación promedio mensual de cada uno de los meses, por lo cual se les dió un formato de texto delimitado por comas, en TXT mediante columnas, con el fin de analizarlo mediante el programa R.

A la información extraída de ERIC III, se le agregó el valor de elevación al convertirlos a puntos vectoriales en el programa GRASS dándoles valores del modelo digital de elevación SRTM, ya que esta información es necesaria para realizar las interpolaciones. Posteriormente se procedió a exportar los puntos vectoriales nuevamente a un formato TXT para poder analizarse en el programa R.

El siguiente paso fue separar por mes los valores de precipitación, elevación y las coordenadas geográficas, para evitar manipular la tabla completa ya que se pueden generar errores al momento de realizar cálculos.

Para crear los mapas de precipitación y temperatura se realizaron las interpolaciones por medio del método de Kriging.

Este método se define como la familia generalizada de algoritmos de regresión de mínimos cuadrados utilizados en geoestadística (Goovaerts, 1999). Al aplicar Kriging se obtiene el valor medio ponderado, donde los pesos asignados a las muestras minimizan la varianza del error, la cual es analizada mediante una función del modelo de semivariograma.

De acuerdo a Carrera y Gaskin (2008) el método de kriging para realizar interpolación de precipitación y temperatura presenta valores más reales, que aquellos obtenidos con los polígonos de Thiessen y distancia inversa cuadrada (Haberlandt, 2007; Goovaerts, 1999).

La interpolación con el método de Kriging tiene diferentes variantes de acuerdo a las necesidades del estudio, estos pueden ser:

Kriging Ordinario: Es un tipo de Kriging donde las variaciones locales de la media se asumen como no cercana a la media de la población, y que se usa solamente para el estimado de la muestra de la vecindad local. Es el método usado más comúnmente por su robustez.

$$Z_{OK}^*(\mathbf{u}) = \sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}^{OK}(\mathbf{u}) Z(\mathbf{u}_{\alpha}) \quad (3)$$

$$\sum_{\alpha=1}^{n(\mathbf{u})} \lambda_{\alpha}^{\text{OK}}(\mathbf{u}) = 1 \quad (4)$$

Dónde: ok es Kriging ordinario y \mathbf{z} es una variable de \mathbf{n} en la ubicación \mathbf{u} .

Kriging Puntual: Estimación del valor de un punto de los valores de la muestra cercana usando kriging. El estimado para un punto será casi similar al estimado por un bloque relativamente cercano centrado en el punto, pero la desviación estándar del kriging calculada será alta. Cuando el punto del Kriging coincide con el lugar de la muestra, el estimado tendrá un valor igual al de la muestra.

Kriging Simple: Es el método Kriging donde se asume que las medias locales son conocidas y relativamente constantes e iguales a la media de la población a través del área de estudio, donde la media de la población es usada como un factor en cada estimado local, con todas las muestras en la misma vecindad (Goovaerts, 1999; Diaz, 2002, Carrera y Gaskin, 2007).

Kriging en bloques: Se considera como una extensión del Kriging ordinario con estimación del valor de un bloque a partir de los valores de una muestra continua, considerando un vecindario local, donde el área de un bloque es un arreglo de aproximadamente 2x2, 3x3, ó 4x4 puntos con centro en cada nodo de la malla especificada, se puede obtener un valor suavizado de la estimación.

El kriging con deriva externa (KDE), considera un proceso no estacionario de funciones, donde se calcula la dependencia espacial por correlación entre las variables auxiliares con respecto a la variable a interpolar, sin utilizar la función de covarianza, siendo esta sustituida por la función semivariograma para datos espaciales. Esta considera la variable de respuesta medida en dos ubicaciones diferentes $z(s_1)$ y $z(s_2)$. Al mismo tiempo se espera que a medida que los dos puntos se separan (es decir, a medida que la diferencia $s_1 - s_2$ se hace más grande, la diferencia medida en la respuesta $z(s_1) - z(s_2)$ también aumentará (Cressie, 1993).

Los métodos de Kriging utilizan información espacial para determinar los patrones de comportamiento de los datos con respecto a la distancia del punto observado para lo cual se utiliza el semivariograma experimental utilizando la siguiente expresión:

$$\hat{\gamma}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2N(\mathbf{h})} \sum_{\alpha=1}^{N(\mathbf{h})} [z(\mathbf{u}_{\alpha}) - z(\mathbf{u}_{\alpha} + \mathbf{h})]^2 \quad (5)$$

Donde \mathbf{z} es una variable de \mathbf{n} en la ubicación \mathbf{u}_{α} , $z(\mathbf{u}_{\alpha})$, $\alpha=1, 2, \dots, n$), separado por una distancia h , siendo $N(h)$ el número de pares de datos clasificados por la distancia y dirección (Carrera y Gaskin, 2007; Goovaerts, 1999).

Los semivariogramas están conformados por tres partes (Cressie, 1993):

- El efecto pepita. Es la altura del semivariograma en donde comienza la curva, se da este efecto por el error de medida y la variación de la escala causando una discontinuidad del origen.
- El umbral es el límite de la altura máxima que puede alcanzar la curva del semivariograma, considerando que a medida que la distancia entre dos puntos se hace mayor la correlación y la covarianza disminuye, hasta hacerse muy pequeña.
- El rango es la distancia a la cual los valores entre sí están insignificamente correlacionados, alcanzando el umbral. También se ha definido como el punto en que la curva es el 95% de la diferencia entre la pepita y el umbral.

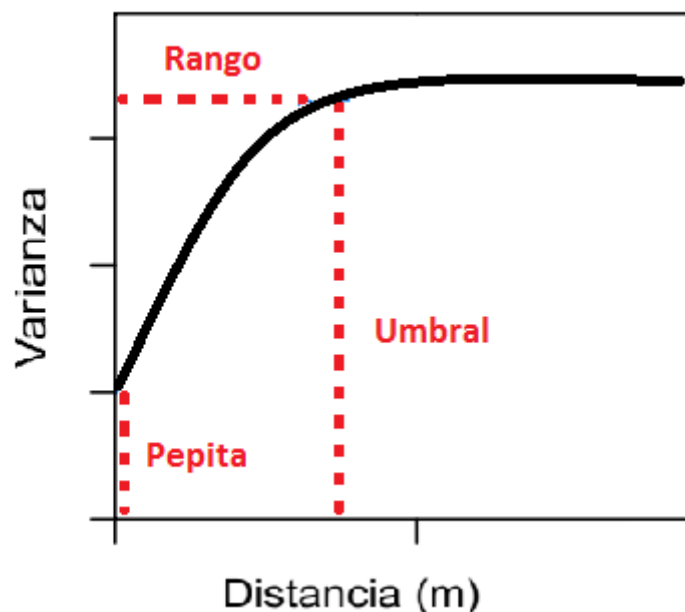


Fig. 10. Partes que comprenden el semivariograma.

Después de observar el comportamiento de los datos de acuerdo al semivariograma experimental, se definió el semivariograma teórico, mediante un ajuste manual. Los parámetros del semivariograma teórico se modificaron hasta que se logró un ajuste aceptable.

4.7.1. Temperatura

Para poder realizar la interpolación mediante el método kriging lo primero que se hizo fue analizar la correlación del valor de interés (precipitación y temperatura) con la variable auxiliar (elevación, latitud y longitud), observando que cuando se correlaciona la temperatura con la elevación se tienen valores altos para cada uno de los meses de los tres años analizados, siendo siempre mayores a 45%, sin embargo, la mayor correlación se presenta en los meses de mayo a septiembre (tabla 6).

Tabla 6. Valores de correlación de temperatura con los diferentes factores para los años 1995, 2001 y 2007.

Mes	1995			2001			2007		
	elevación	latitud	longitud	elevación	latitud	longitud	elevación	latitud	longitud
enero	-0.54	0.045	-0.322	-0.49	0.065	-0.335	-0.567	-0.057	-0.382
febrero	-0.629	0.183	-0.427	-0.561	0.081	-0.377	-0.468	-0.029	-0.269
marzo	-0.605	0.178	-0.357	-0.494	0.135	-0.261	-0.56	0.031	-0.35
abril	-0.647	0.191	-0.343	-0.583	0.256	-0.402	-0.576	0.093	-0.33
mayo	-0.767	0.312	-0.462	-0.711	0.235	-0.554	-0.664	0.146	-0.411
junio	-0.812	0.287	-0.566	-0.748	0.229	-0.548	-0.791	0.197	-0.586
julio	-0.838	0.301	-0.61	-0.713	0.227	-0.528	-0.764	0.188	-0.533
agosto	-0.829	0.279	-0.598	-0.727	0.215	-0.55	-0.776	0.182	-0.591
septiembre	-0.83	0.234	-0.596	-0.717	0.13	-0.543	-0.781	0.136	-0.582
octubre	-0.672	0.087	-0.455	-0.61	0.067	-0.471	-0.736	0.028	-0.569
noviembre	-0.646	0.051	-0.431	-0.446	0.054	-0.273	-0.535	-0.103	-0.338
diciembre	-0.548	0.03	-0.338	-0.446	0.049	-0.285	-0.491	-0.091	-0.302

La mayor correlación entre los datos de elevación con la temperatura en algunos meses es causada por la temporada de temperaturas altas, sin verse reducida por los frentes fríos que reducen la temperatura de manera generalizada evitando observar los valores reales de temperatura de la zona.

El comportamiento de la elevación con respecto a la temperatura se repite durante todos los años y todos los meses (figura. 11), por lo cual se realizó la interpolación con estos valores mediante el método Kriging con deriva externa para el 1995, 2001 y 2007.

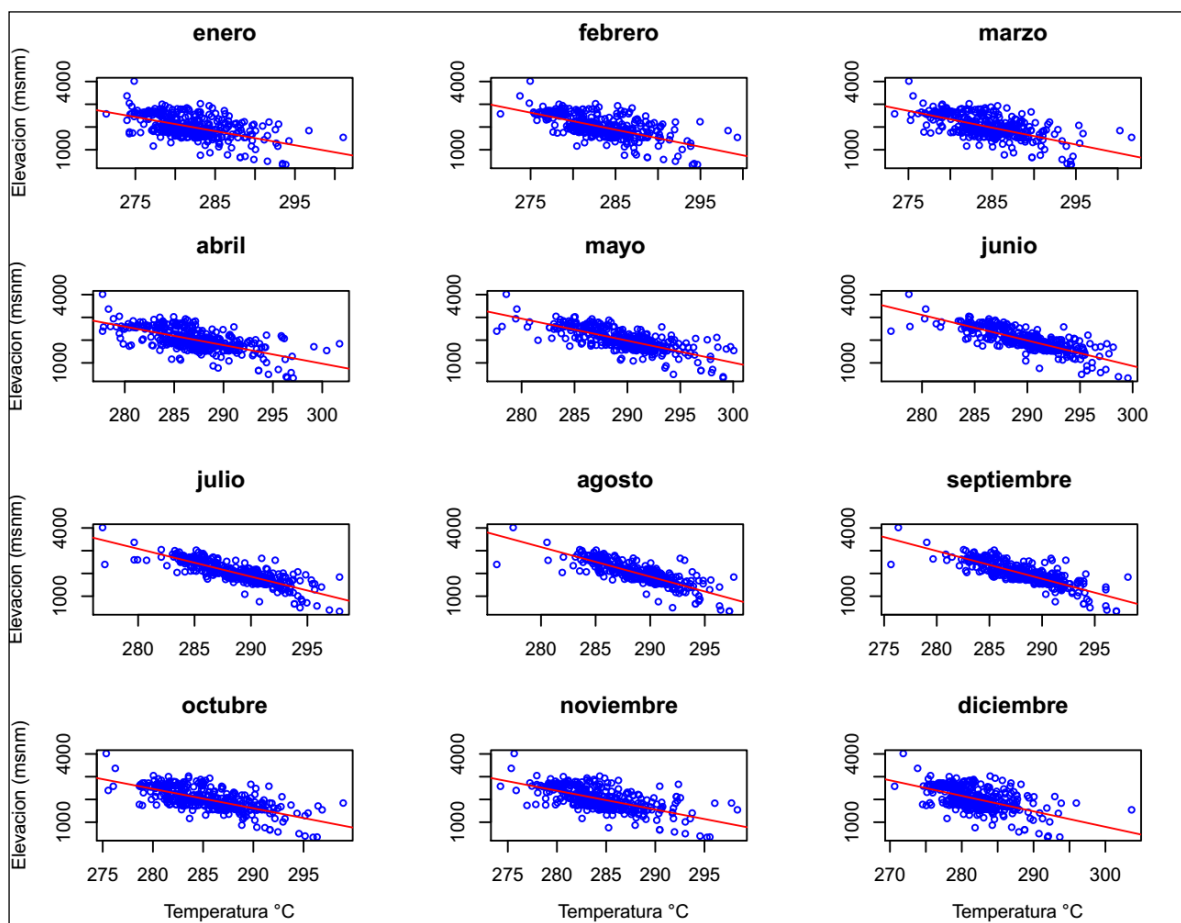


Fig. 11. Gráfica de dispersión de valores de temperatura con respecto a la elevación (puntos azules) y línea de tendencia (línea roja) para el año 1995.

Para realizar el Kriging se manipularon las tablas de datos con el programa R, convirtiendo datos numéricos a puntos espaciales indicándole al programa su posición mediante la latitud y longitud.

La interpolación de temperatura se realizó en el programa GRASS GIS en una interfaz del programa R, mediante las librerías “sp” (gestiona información espacial), “gstat” (realiza los procesos de geoestadística), “rgrass7” (crea una interfaz de R en el programa GRASS GIS) y “raster” (los valores de interpolación los convierte a un formato raster).

En la manipulación del semivariograma el programa R permite modificar la distancia donde puede influir la información considerando los puntos de datos incluidos en las estimaciones del semivariograma de la muestra (Pebesma, 2004). Para el estudio se utilizó la distancia de 50 kilómetros (figura 12), considerando que hasta esta distancia los datos de temperatura están relacionados.

El semivariograma experimental se realizó considerando a la elevación como variable auxiliar (Fig. 12).

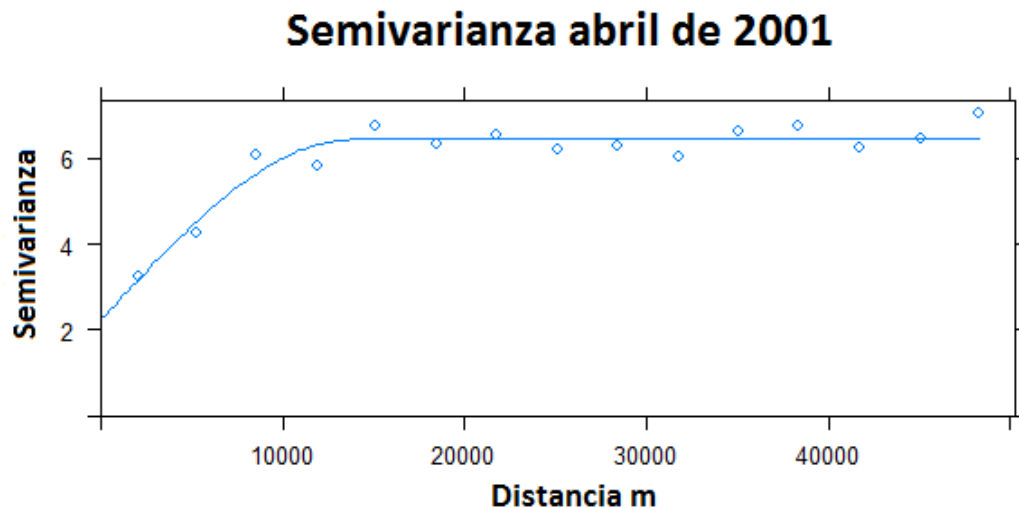


Fig. 12. Ejemplo de grafica de semivariograma de temperatura y semivariograma teórico (línea continua).

A pesar de presentar el semivariograma experimental una distribución de los datos irregular, el semivariograma teórico se pudo ajustar a modelos esféricos, lineales, exponenciales y sólo para el mes de marzo de 2017 se ajusta un modelo gaussiano.

Cada semivariograma experimental se ajustó manualmente a los parámetros de umbral, efecto pepita y rango, siendo en total 36 ajustes para los tres años del estudio.

Para comprobar la eficiencia de la interpolación se realizó una validación cruzada, la cual consiste en obtener un valor predicho por interpolación en cada una de las estaciones meteorológicas y compararlo con el valor real de esa estación, obteniendo la correlación y el error medio cuadrático (RMSE). Este procedimiento se realizó para todas las estaciones y en cada uno de los meses del período de estudio como se puede observar en la tabla 7 donde se muestra que los meses con mayor correlación son de mayo a octubre, bajando en los meses de diciembre. Sin embargo, la correlación nunca es menor a 0.4.

Tabla 7. Valores de correlación de temperatura obtenida por validación cruzada de la interpolación contra los valores reales de las estaciones meteorológicas y error medio cuadrático resultados de interpolación.

Mes	1995			2001			2007		
	Cor	Temp	RMSE	Cor	Temp	RMSE	Cor	Temp	RMSE
enero	0.536	8.79	3.617	0.539	7.71	3.175	0.539	8.54	2.877
febrero	0.642	10.11	3.203	0.604	8.99	2.903	0.476	8.62	3.111
marzo	0.627	11.23	3.231	0.584	9.82	2.927	0.546	10.86	3.057
abril	0.653	13.91	2.949	0.632	13.29	2.709	0.608	12.40	2.627
mayo	0.769	16.42	2.41	0.765	13.97	2.233	0.66	14.29	2.535
junio	0.804	16.62	2.094	0.784	14.49	1.957	0.735	15.02	2.184
julio	0.84	15.63	1.806	0.761	14.28	1.958	0.698	14.72	2.071
agosto	0.817	15.70	1.794	0.763	14.26	1.995	0.702	14.47	2.065
septiembre	0.816	14.92	1.93	0.743	13.73	2.031	0.698	13.78	2.207
octubre	0.666	12.20	2.903	0.63	11.80	2.394	0.691	11.72	2.384
noviembre	0.663	11.28	2.837	0.489	8.91	3.171	0.524	9.58	3.126
diciembre	0.573	8.85	3.3	0.453	8.32	3.149	0.476	8.86	3.279

Cor=Correlacion, Temp=Temperatura media mensual y RMSE=Error medio cuadrático

En seguida se realizó la interpolación mediante kriging simple con una variable auxiliar, que en este caso fue la elevación. El procedimiento se llevó a cabo con el programa R, en la consola del programa GRASS GIS.

Una vez que se tuvieron los 36 mapas con los resultados de la interpolación, se seleccionó una tabla de color en común que pudiera mostrar las diferencias de temperatura para los 12 meses del año (figuras 13, 14 y 15).

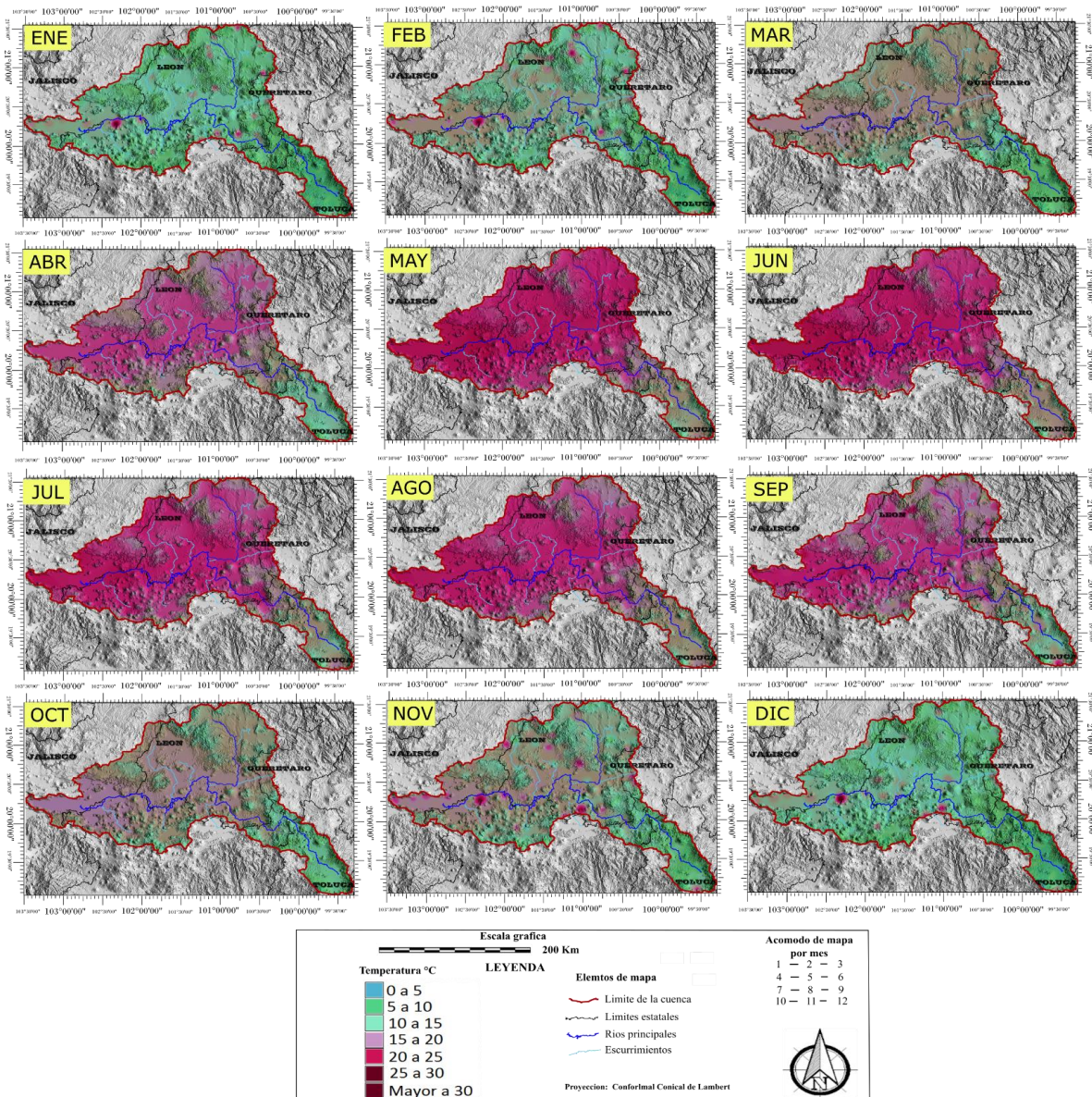
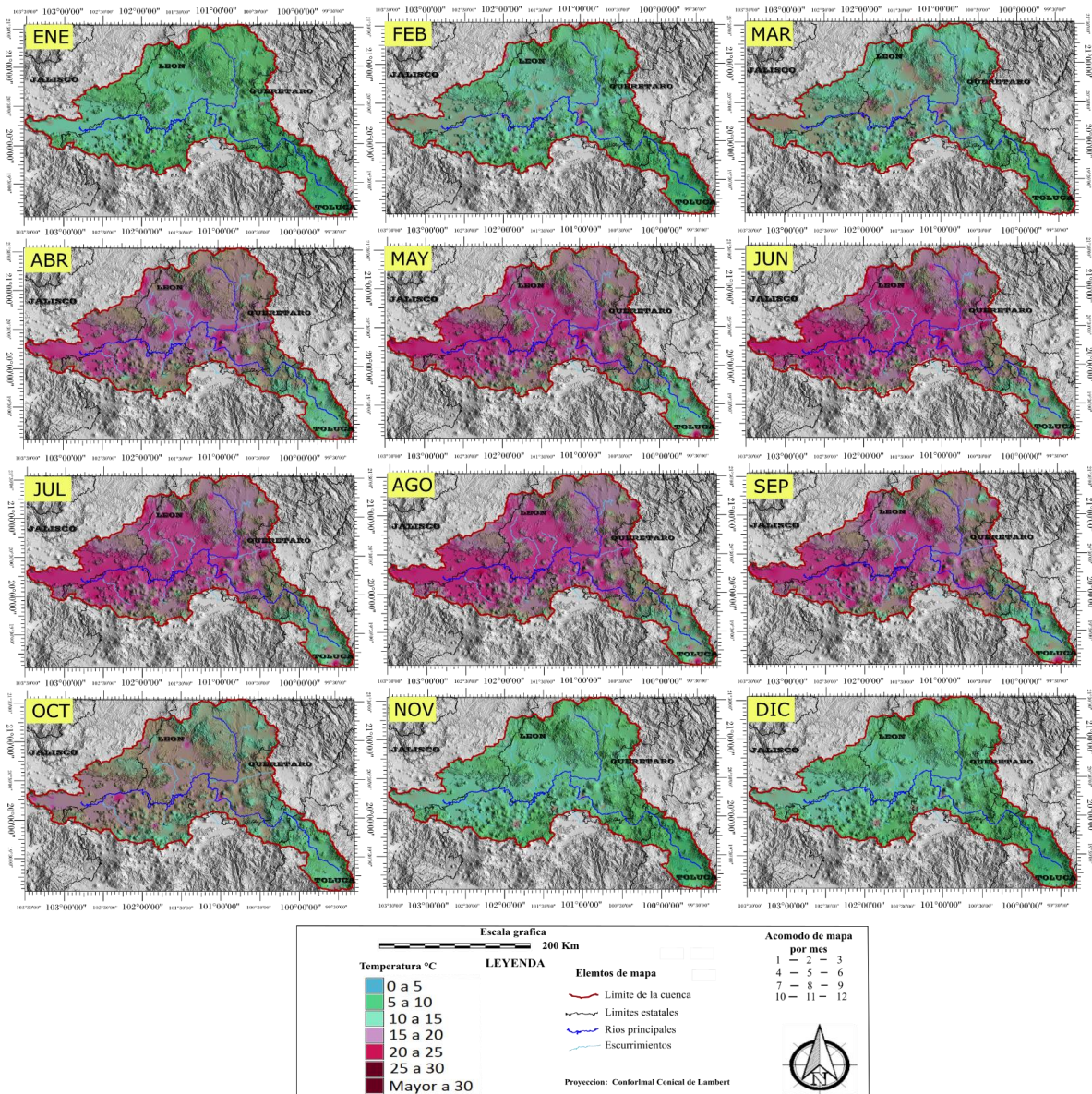


Fig. 13. Variación espacial de temperatura para el año 1997.



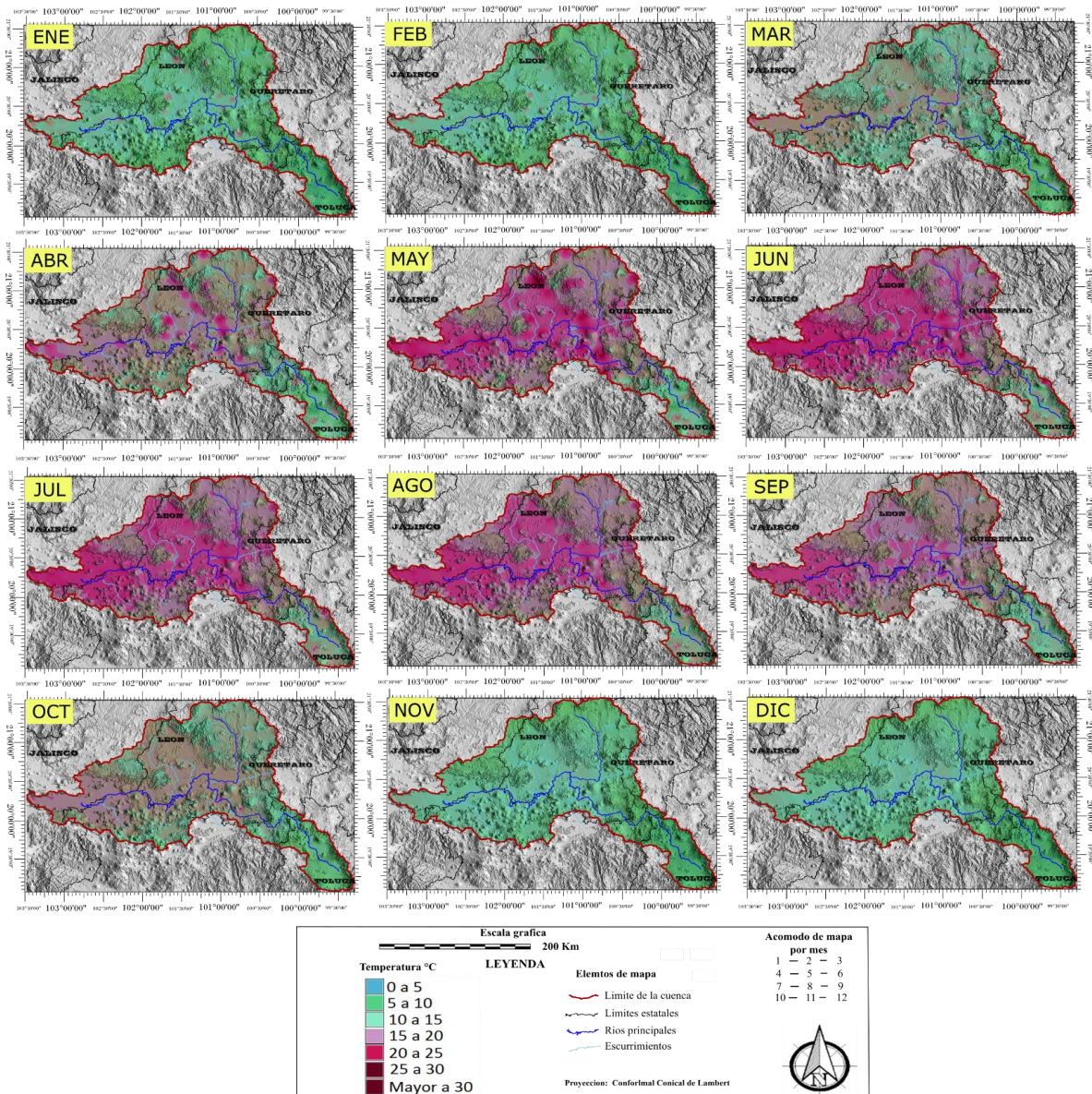


Fig. 15. Variación espacial de temperatura para el año 2007.

Los meses de mayor temperatura durante el periodo de estudio son de abril a septiembre, mientras que los meses fríos son enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre, presentando las temperaturas más bajas en noviembre, diciembre, enero y febrero.

En el Estado de México (cerca de Toluca) se encuentra la zona donde las temperaturas son más bajas. De acuerdo a los mapas de temperatura se puede observar que para el año 1995 se presentaron valores más altos de temperatura en toda el área de la cuenca Lerma Chapala,

principalmente en los meses de mayo a agosto. En los años 2001 y 2007 la temperatura mensual fue menor, aunque los meses con las mayores temperaturas fueron los mismos.

Considerando que el comportamiento de la temperatura para el año 1995 fue atípico, se revisó el registro (tabla 8) que mantiene la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) sobre el monitoreo del fenómeno de oscilación del sur (ENSO, El niño), encontrando que efectivamente el año de 1995 fue uno de los más calientes como se observa en la figura 13 aunque los meses no coinciden, porque el área donde se hace el muestreo se encuentra en el océano pacífico.

*Tabla 8. Valores de temperatura superiores al promedio anual de acuerdo al monitoreo de NOAA en °C.
(en color rojo los valores muy altos y en azul los valores muy bajos)*

	1995	2001	2007
enero	0.9	-0.7	0.7
febrero	0.7	-0.5	0.4
marzo	0.5	-0.4	0.1
abril	0.3	-0.3	-0.1
mayo	0.2	-0.2	-0.2
junio	0	-0.1	-0.3
julio	-0.2	-0.1	-0.4
agosto	-0.5	-0.1	-0.6
septiembre	-0.7	-0.2	-0.9
octubre	-0.9	-0.3	-1.1
noviembre	-1	-0.4	-1.3
diciembre	-0.9	-0.3	-1.3

4.7.2. Precipitación

Para la precipitación, la elevación no siempre se debe usar como variable auxiliar porque genera un mayor error (Carrera y Gaskin, 2007), ya que para cada uno de los meses cambia por los rangos de latitudes, altitudes, sistemas circulatorios y corrientes de aire que provienen

del norte ocasionando una variabilidad constante del monzón que afecta principalmente al norte del país. (Giddings et al, 2005; Andrew et al., 1999).

En la tabla 9 se puede observar la correlación de la precipitación con la elevación, latitud y longitud, donde dependiendo del mes se correlaciona más con alguna variable, aunque los valores de correlación no son tan altos como en la temperatura se deben usar las variables auxiliares para mejorar el resultado de la correlación como lo indica Carrera (2013) siempre corroborando esto con una validación cruzada.

De este modo se puede observar que para el año 1995 hay una mayor correlación con la coordenada norte y para el 2001 es más variable pues los valores máximos están distribuidos entre las tres variables. Para el año 2007 los primeros 5 meses del año se relacionan con la coordenada oeste y los 6 siguientes con la coordenada norte exceptuando mayo que se relaciona más con la elevación.

Tabla 9. Valores de correlación de precipitación con los diferentes factores para los años 1995, 2001 y 2007.

Mes	1995			2001			2007		
	elevación	latitud	longitud	elevación	latitud	longitud	elevación	latitud	longitud
enero	<u>0.30</u>	-0.30	0.25	0.19	-0.22	<u>0.26</u>	-0.06	0.20	<u>-0.39</u>
febrero	0.40	<u>-0.45</u>	0.29	0.26	-0.06	<u>0.40</u>	0.13	0.09	<u>0.17</u>
marzo	<u>0.47</u>	-0.36	0.44	0.23	<u>-0.44</u>	0.09	0.40	-0.22	<u>0.49</u>
abril	<u>0.52</u>	-0.51	0.50	<u>0.60</u>	-0.44	0.52	0.47	-0.11	<u>0.56</u>
mayo	0.32	<u>-0.37</u>	0.34	0.40	<u>-0.44</u>	0.25	<u>0.62</u>	-0.31	0.62
junio	0.12	<u>-0.59</u>	-0.04	0.03	<u>-0.34</u>	-0.13	-0.09	<u>0.25</u>	-0.32
julio	0.00	<u>-0.24</u>	-0.13	-0.06	-0.21	<u>-0.41</u>	0.06	<u>-0.17</u>	-0.03
agosto	-0.12	<u>-0.28</u>	-0.16	0.07	<u>-0.27</u>	-0.18	0.02	<u>-0.58</u>	0.01
septiembre	-0.09	<u>-0.34</u>	-0.16	0.27	<u>-0.39</u>	0.14	0.24	<u>-0.46</u>	0.04
octubre	0.33	<u>-0.37</u>	0.25	0.13	<u>-0.32</u>	0.12	0.17	<u>-0.59</u>	0.15
noviembre	0.33	<u>-0.49</u>	0.36	<u>0.21</u>	-0.06	0.19	0.14	<u>0.03</u>	0.02
diciembre	0.41	<u>-0.54</u>	0.35	<u>0.16</u>	-0.13	0.13	0.16	<u>-0.29</u>	0.06

Los valores más correlacionados se encuentran subrayados

Es muy difícil definir la variable auxiliar, por la irregularidad de la precipitación en estaciones muy cercanas, como se puede ver en la figura 16, donde se observa la distribución

de la precipitación de acuerdo a las estaciones meteorológicas durante el mes de agosto de 2001.

En esta misma figura se pueden distinguir estaciones con registro de precipitación mayor a 400 mm y a distancias muy próximas otras estaciones con precipitaciones menores a 50 mm, sin importar la elevación, la latitud o longitud. Esta es una de las razones por la cual los valores de correlación son muy bajos, presentándose principalmente en los meses más secos del año por las lluvias aisladas, y en pocas ocasiones para meses con altas precipitaciones como es el caso de agosto de 2001.

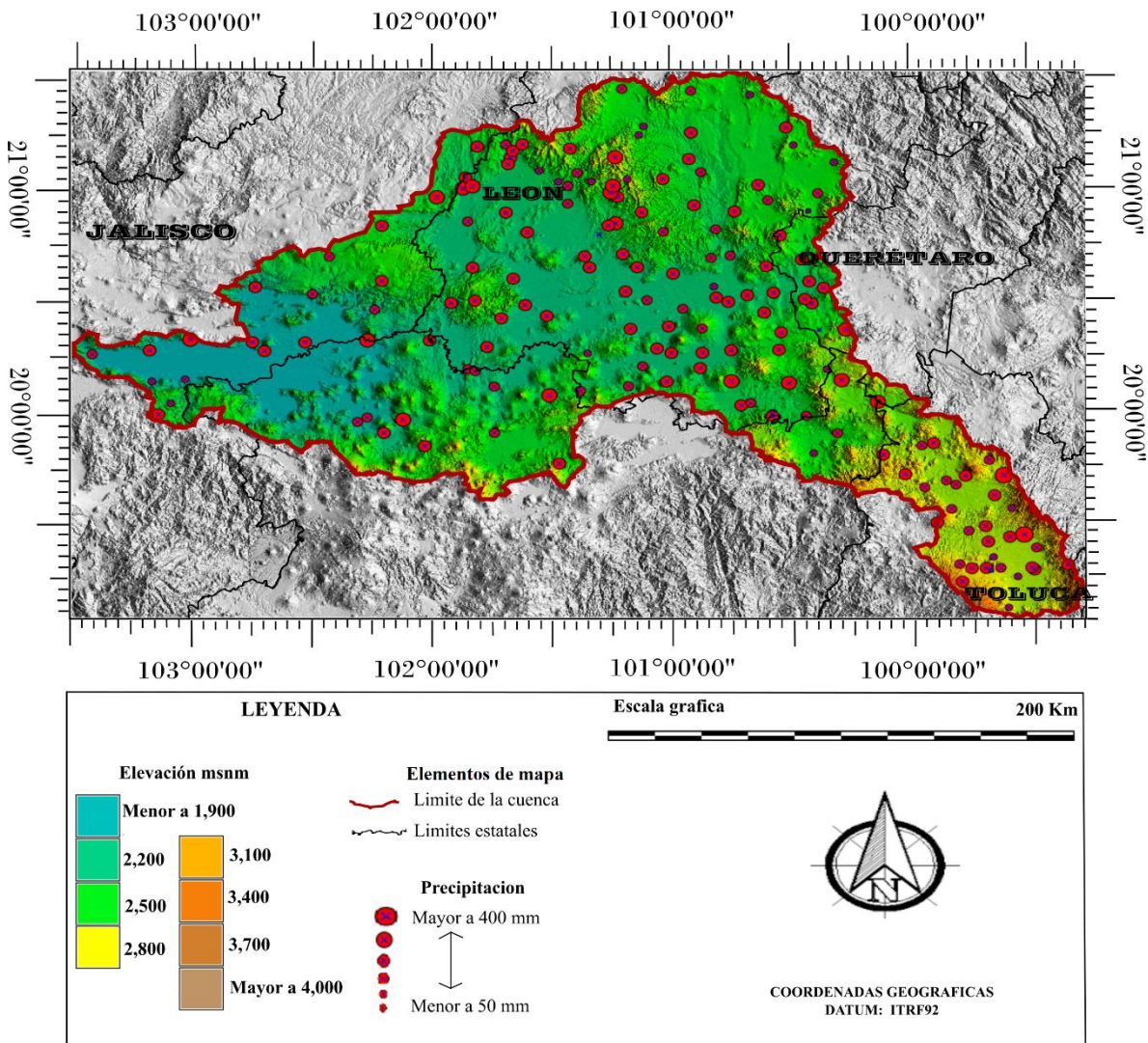


Fig. 16. Diferencias de precipitación por estación meteorológica. Para el mes de agosto de 2001

Las distribuciones de los valores de precipitación en la gráfica de dispersión muestran la distribución irregular de los datos (Figura 17), tendiendo a ser normal sobre todo en los meses de lluvias, sin embargo, para la mayoría de meses no sucede, siendo baja la precipitación dominante y solo elevada durante los meses de mayo a septiembre.

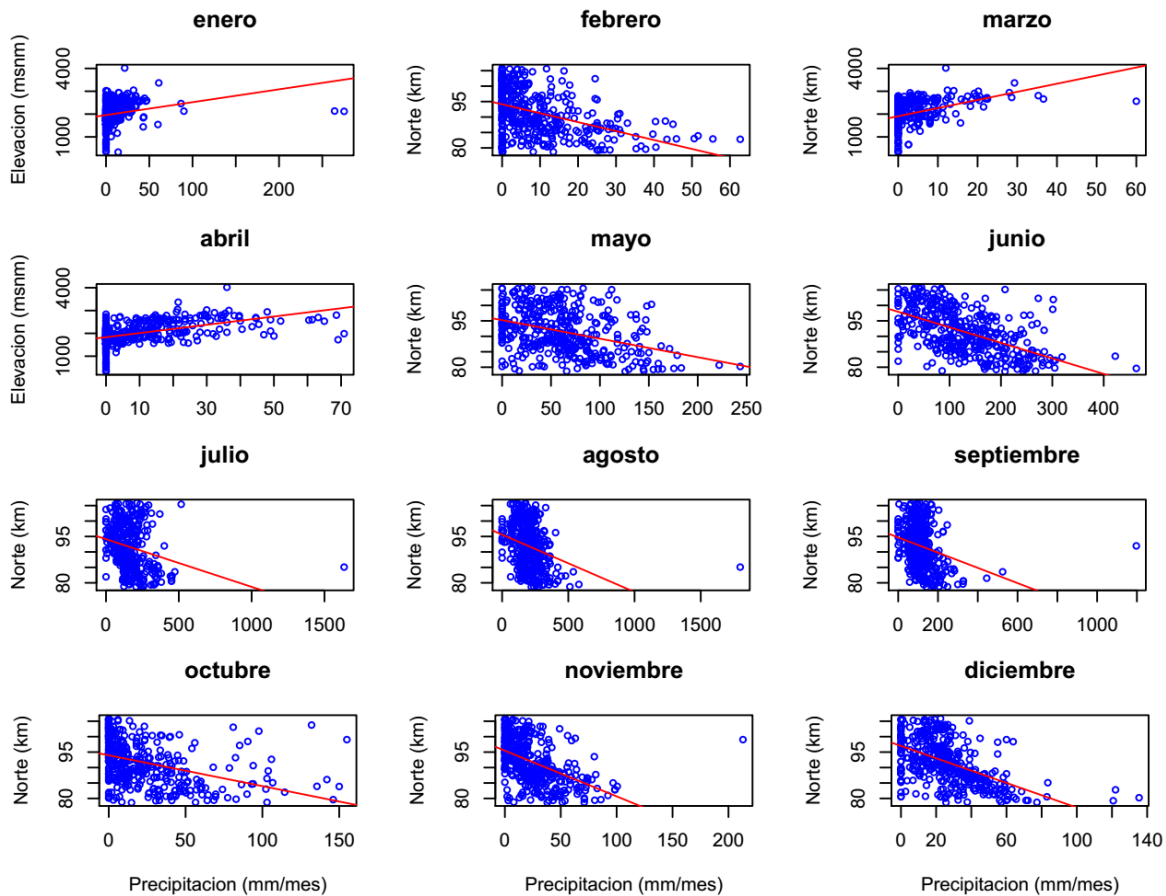


Fig. 17. Gráfica de dispersión de valores de precipitación con respecto a la variable auxiliar (líneas azules) y línea de tendencia (línea roja) para el año 1995.

Del mismo modo que en la interpolación de la temperatura al definir la variable auxiliar se realizó el Kriging utilizando el programa R para hacer los cálculos.

Al convertir datos numéricos a puntos espaciales, se graficaron para comprobar su distribución espacial, del mismo modo los programas utilizados para las interpolaciones de precipitación fueron el GRASS GIS y R, usando una distancia de 50 kilómetros para el semivariograma.

Semivarianza junio de 2001

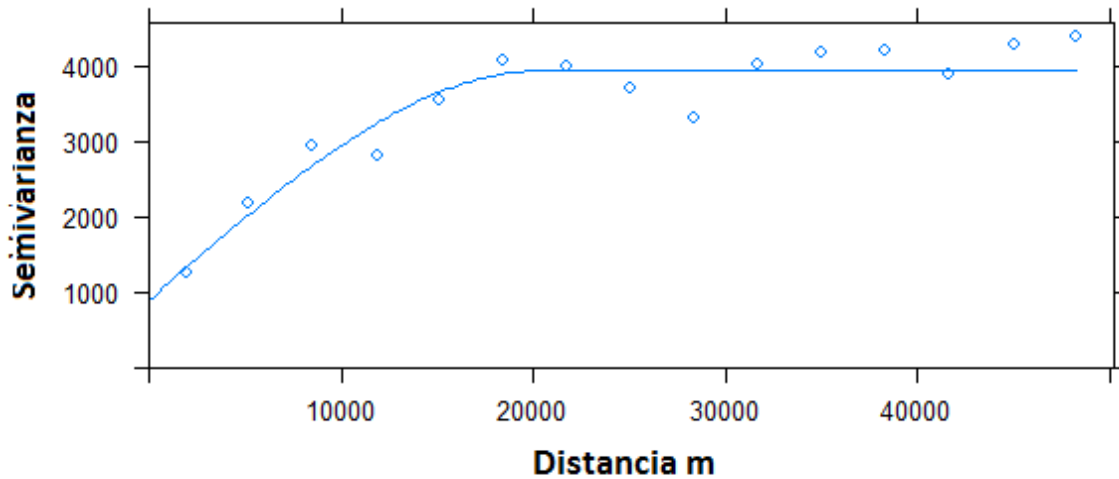


Fig. 18. Ejemplo de ajuste de semivariograma de precipitación.

Como se observa en la figura 18 se ajustó el semivariograma teórico al semivariograma experimental. Se ajustaron los parámetros para los 36 meses del semivariograma experimental de manera manual en los parámetros de umbral, efecto pepita y rango, así como el ajuste de modelos esféricos, lineales, exponenciales y únicamente para el mes de marzo de 2017 se ajusta un modelo gaussiano.

Al realizar la validación cruzada para los datos de precipitación, se realizó la prueba de correlación y el cálculo del error medio cuadrático como se observa en la tabla 11. En esta tabla se puede ver que la correlación en general no alcanza valores tan altos como la temperatura, siendo menores los valores de correlación en los meses más secos y aumentando en los meses de lluvias (mayo a septiembre), cuando los meses de lluvias no fueron regulares o hubo menor precipitación como en el mes de agosto de 2001 (ver figura 20) los valores de la correlación también fueron menores.

Así como la correlación, el error medio cuadrático también aumenta con respecto al incremento de las cantidades de precipitación (Tabla 10).

Tabla 10. Valores de correlación de precipitación obtenida por validación cruzada de la interpolación contra los valores reales de las estaciones meteorológicas y error medio cuadrático resultados de interpolación.

Mes	1995			2001			2007		
	cor	pp	rmse	cor	pp	rmse	cor	pp	Rmse
enero	0.654	9.79	16.651	0.345	4.49	6.937	0.361	15.16	13.297
febrero	0.573	9.01	8.729	0.466	6.48	9.152	0.393	21.23	15.029
marzo	0.632	3.06	4.873	0.576	14.42	12.908	0.657	7.38	11.13
abril	0.706	10.33	9.82	0.667	28.24	23.973	0.646	13.35	13.565
mayo	0.418	60.65	39.201	0.525	57.16	37.174	0.645	35.41	34.33
junio	0.607	127.98	63.595	0.551	153.56	59.122	0.319	161.88	64.383
julio	0.57	157.23	96.272	0.488	177.72	72.039	0.382	214.77	71.086
agosto	0.454	206.16	105.879	0.342	163.3	71.119	0.542	159.88	74.875
septiembre	0.38	116.35	76.491	0.341	114.72	75.485	0.624	126.81	55.651
octubre	0.503	22.44	24.516	0.328	38.29	29.147	0.604	41.34	29.855
noviembre	0.55	24.8	19.751	0.396	5.41	7.542	0.165	14.44	15.241
diciembre	0.573	26.64	15.673	0.272	3.13	7.399	0.314	4.72	7.476

Cor=Correlacion, pp=Precipitación registrada y RMSE=Error medio cuadrático

A pesar de los valores bajos de correlación y valores altos de error medio cuadrático, la interpolación brindó información más confiable que las fuentes de información cartográfica existente, ya que muchas de ellas presentan valores promedios anuales en forma de isoyetas o de polígonos, tanto de fuentes nacionales (INEGI, CONABIO, etc) como fuentes internacionales (USDA, NOAA, etc).

De la misma manera que en los mapas de temperatura los mapas de precipitación se realizaron en formato raster con los valores predichos obteniendo 36 para los tres años de estudio, los cuales fueron manipulados para obtener los mapas de salida que se observan a continuación (figuras 19, 20 y 21).

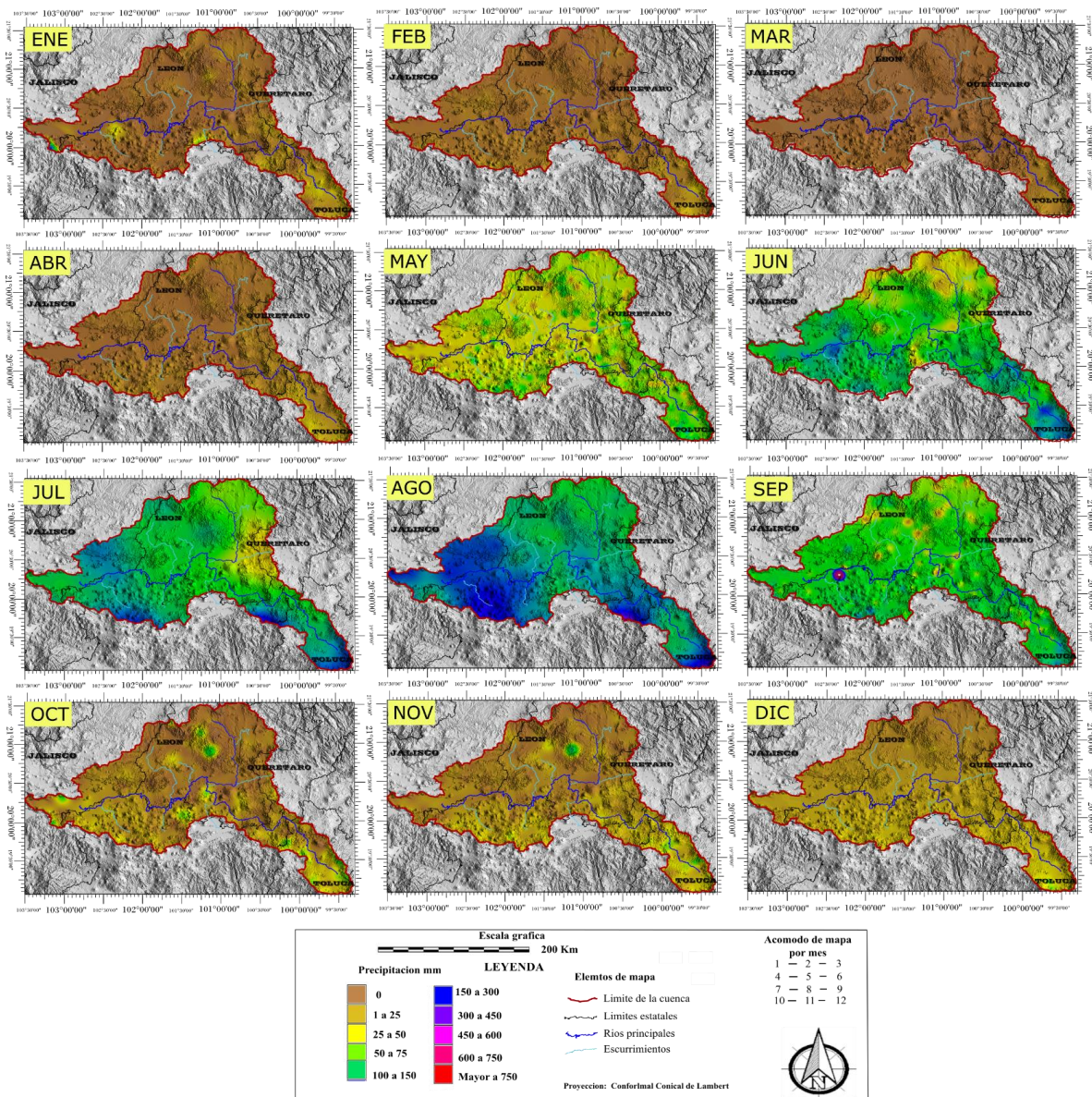


Fig. 19. Variación espacial de precipitación para el año 1995.

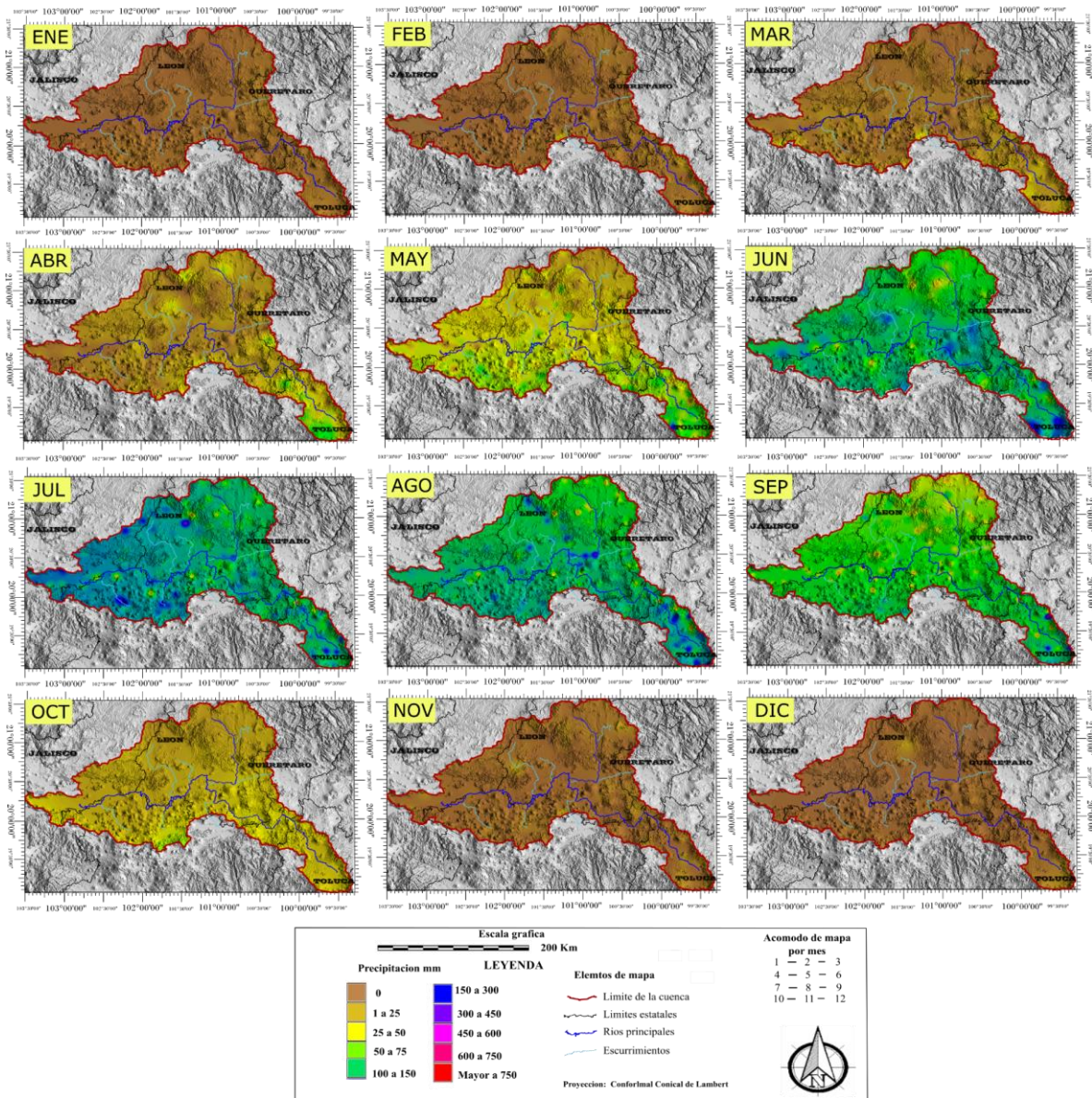


Fig. 20. Variación espacial de precipitación para el año 2001.

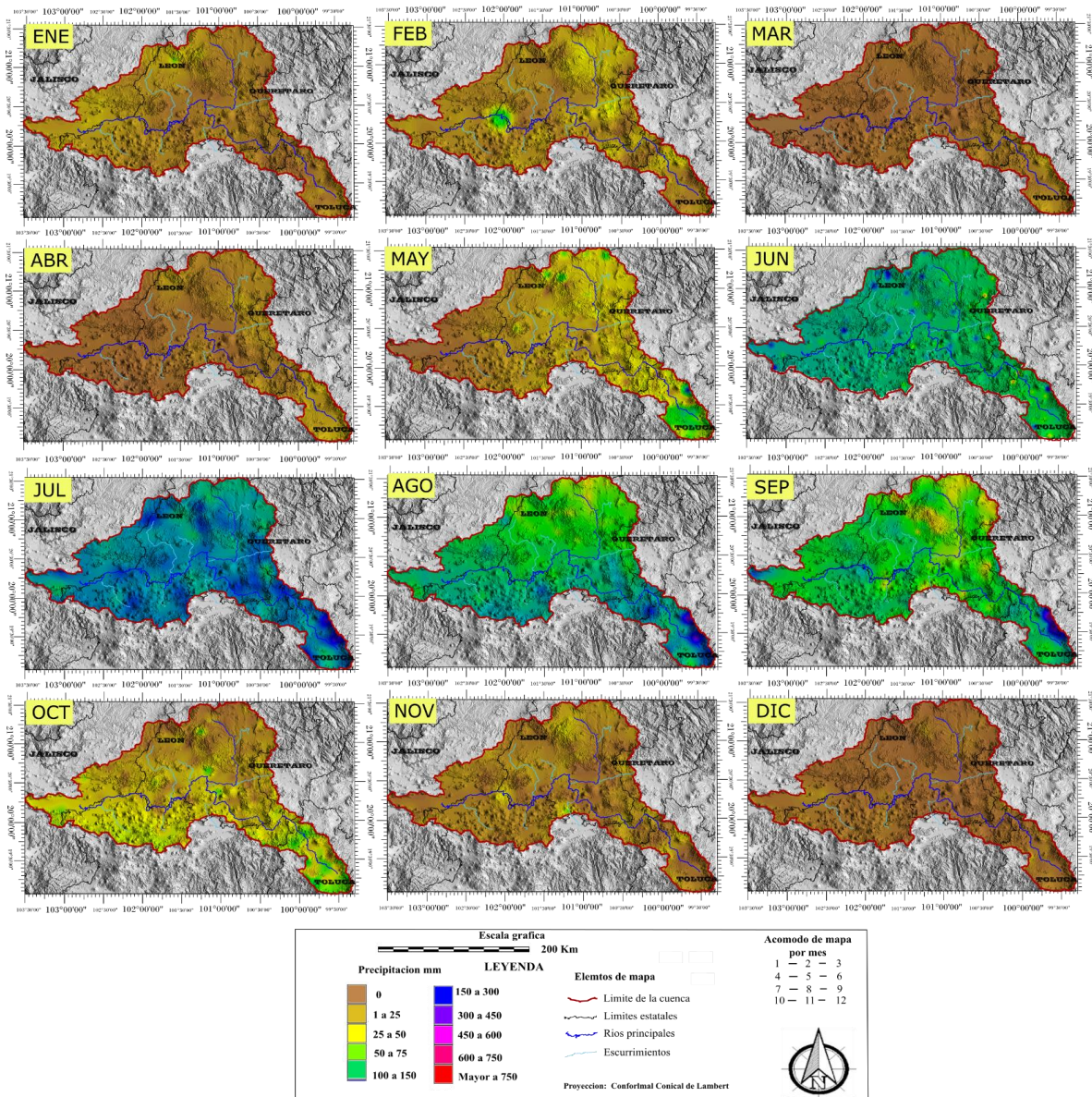


Fig. 21. Variación espacial de precipitación para el año 2007.

Los meses de mayor precipitación para el periodo de estudio son de mayo a septiembre, mientras que los meses de octubre a enero presentan poca precipitación llegando a tener algunas lluvias esporádicas; sin embargo, los meses de febrero, marzo y abril son los más secos.

Para el año 2007 se presentaron las mayores precipitaciones, aunque en el mes de mayo se registró un volumen muy alto que se prolongó hasta el mes de octubre. Para el mes de julio

se tuvieron las mayores precipitaciones de tres años del estudio en la cuenca, esto también puede estar relacionado con los valores que se presentan en la tabla 9, al considerarse temperaturas muy bajas de acuerdo al monitoreo del fenómeno del Niño.

La zona cercana a Toluca en el estado de México es donde se presentan las mayores precipitaciones, además de presentar periodos más amplios que en el resto de la cuenca.

4.8. Escurrimiento superficial

El cálculo del escurrimiento superficial utilizó gran parte de la información obtenida como fue la precipitación, temperatura, edafología, pendiente y uso de suelo. Para determinar el escurrimiento superficial se utilizaron los coeficientes de Kennessey (Tabla 11), mencionados en Spadoni et al., (2010) y Ghiglieri et al. (2014).

Tabla 11. Tabla de coeficientes de Kennessey (Spadoni et al. en 2010 y Ghiglieri et al. en 2014).

		Índice de Aridez	
		Menor a 25	de 25 a 40
	Muy baja	0.21	0.26
	Baja	0.16	0.21
Permeabilidad	Media	0.12	0.16
	Buena	0.06	0.08
	Baja	0.03	0.04
	más de 35	0.22	0.26
Pendiente %	de 10 a 35	0.12	0.16
	de 3.5 a 10	0.01	0.03
	menor de 3.5	0	0.01
	Sin vegetación	0.26	0.28
	Pastizal	0.17	0.21
Uso de suelo	Cultivos	0.07	0.11
	Bosques	0.03	0.04

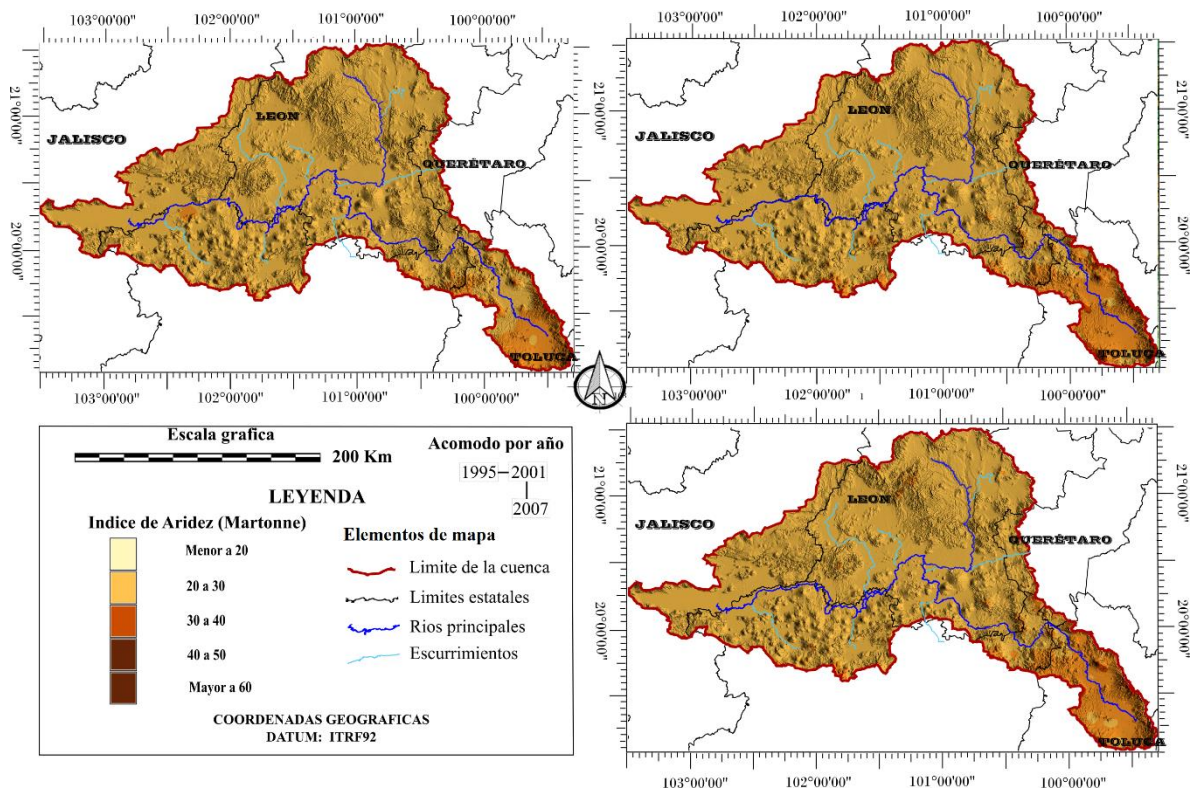
La aridez se evalúa sobre la base de las variables del clima (conocida como índice de aridez), o de acuerdo con la FAO, sobre la base de cuantos días el balance de agua permite el crecimiento de las plantas (estación de crecimiento).

El índice de aridez es déficit de agua a lo largo de todo el año, y es indicador de una situación hidroclimática permanente y no temporal como es la sequía (Mercado et al., 2010). Este índice utiliza la relación P/ETP para clasificar las tierras áridas en hiperáridas, áridas, semiáridas y secas subhúmedas (Cuadro 2). FAO, (2007), Maliva y Missimer (2012).

Para poder llevar acabo el cálculo de los índices de Kennessy fue necesario obtener el índice de aridez siguiendo el método de Martonne (1926) mencionado por Spadoni et al., (2010) y Ghiglieri et al., (2014), el cual requiere de cálculo de promedios mensuales de precipitación y temperatura como se muestra en la siguiente formula.

$$Ia = \frac{\left(\frac{P}{T + 10} + 12 \frac{p}{t} \right)}{2} \quad (6)$$

Donde p es la precipitación del mes más seco en mm , t es la temperatura del mes más caliente en $^{\circ}C$, P es el raster con valores mensuales de precipitación en mm y T es el raster con valores de temperatura en $^{\circ}C$. Al aplicar este procedimiento, se obtuvo la distribución del índice de aridez mostrado en la figura 22.



La cuenca Lerma Chapala presenta un índice entre 20 y 40 y sólo algunas pequeñas áreas llegan de 40 a 50.

4.9. Edafología

El movimiento del agua en el suelo es el principal indicador de la capacidad de recarga siendo varios factores físicos, químicos y biológicos los que influyen (como el tamaño de los tubos capilares (Sophocleous et al. 2015)). La capacidad máxima de retención de agua varía en función de la textura del suelo y ocurre cuando la totalidad del espacio poroso en el suelo se encuentra saturado de agua.

Para este trabajo se consideraron como indicadores los valores de capacidad de agua disponible para cada uno de los tipos de suelo, determinando con ello las 5 categorías de permeabilidad del suelo. La tasa de recarga es más baja cuando se tienen valores altos de capacidad de agua disponible junto con valores bajos de conductividad saturada del suelo

(Ks), pues la cantidad de agua que puede reponer el déficit hídrico del suelo es limitada. Para este trabajo se consideraron 24 tipos de suelo diferentes como se observa en la tabla 12.

Tabla 12. Tipo de suelo y permeabilidad ajustado a coeficientes de Kennessy.

TIPO DE SUELO	PERMEABILIDAD
ARENOSOL	ALTA
LIXISOL	ALTA
FERRALSOL	ALTA
LUVISOL	BUENA
NITISOL	BUENA
DURISOL	BUENA
CHERNOZEM	BUENA
REGOSOL	BUENA
UMBRISOL	BUENA
ACRISOL	BUENA
PODZOL	MEDIA
FLUVISOL	MEDIA
SOLONETZ	MEDIA
PHAEOZEM	MEDIA
LEPTOSOL	MEDIA
KASTAÑOZEM	MEDIA
GLEYSOL	MEDIA
SOLONCHAK	MEDIA
CAMBISOL	MEDIA
VERTISOL	MEDIA
PLANOSOL	BAJA
ANDOSOL	MUY BAJA
CALCISOL	MUY BAJA
HISTOSOL	MUY BAJA

4.10. Uso de suelo y vegetación

La información que brinda el INEGI de uso de suelo y vegetación contiene de 170 a 176 categorías, las cuales fueron reducidas a 17 como un primer paso (figura 4) omitiendo aquellos que no se presentaban en el área para poder manipularse de mejor manera, y posteriormente se reclasificaron de acuerdo a los coeficientes de Kennessey, donde solo se consideran 4 categorías. Esta agrupación se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Reclasificación de uso de suelo y vegetación según INEGI ajustado a coeficientes de Kennessey.

Uso de suelo y vegetación (INEGI)	Reclasificación
Agricultura de riego	Agrícola
Agricultura de temporal	Agrícola
Bosque de coníferas	Bosque
Bosque de encino	Bosque
Mezquital	Bosque
Selvas perennifolias y subperenifolias	Bosque
Selvas caducifolias	Bosque
Matorral	Pastizal y Matorral
Pastizal	Pastizal y Matorral
Popal	Pastizal y Matorral
Pradera de alta montaña	Pastizal y Matorral
Sabanas	Pastizal y Matorral
Asentamientos humanos	Sin Vegetación
Cuerpo de agua	Sin Vegetación
Sin vegetación aparente	Sin Vegetación
Tular	Sin Vegetación

De acuerdo a los índices de Kennessy mientras mayor es la pendiente, menor capacidad de infiltración se presenta y por lo tanto mayor capacidad de escurrimiento tendría el área. Por lo tanto, las zonas montañosas con elevadas pendientes, tienden a promover el escurrimiento, sin embargo, esto se ve limitado en muchas ocasiones por el tipo de suelo y vegetación.

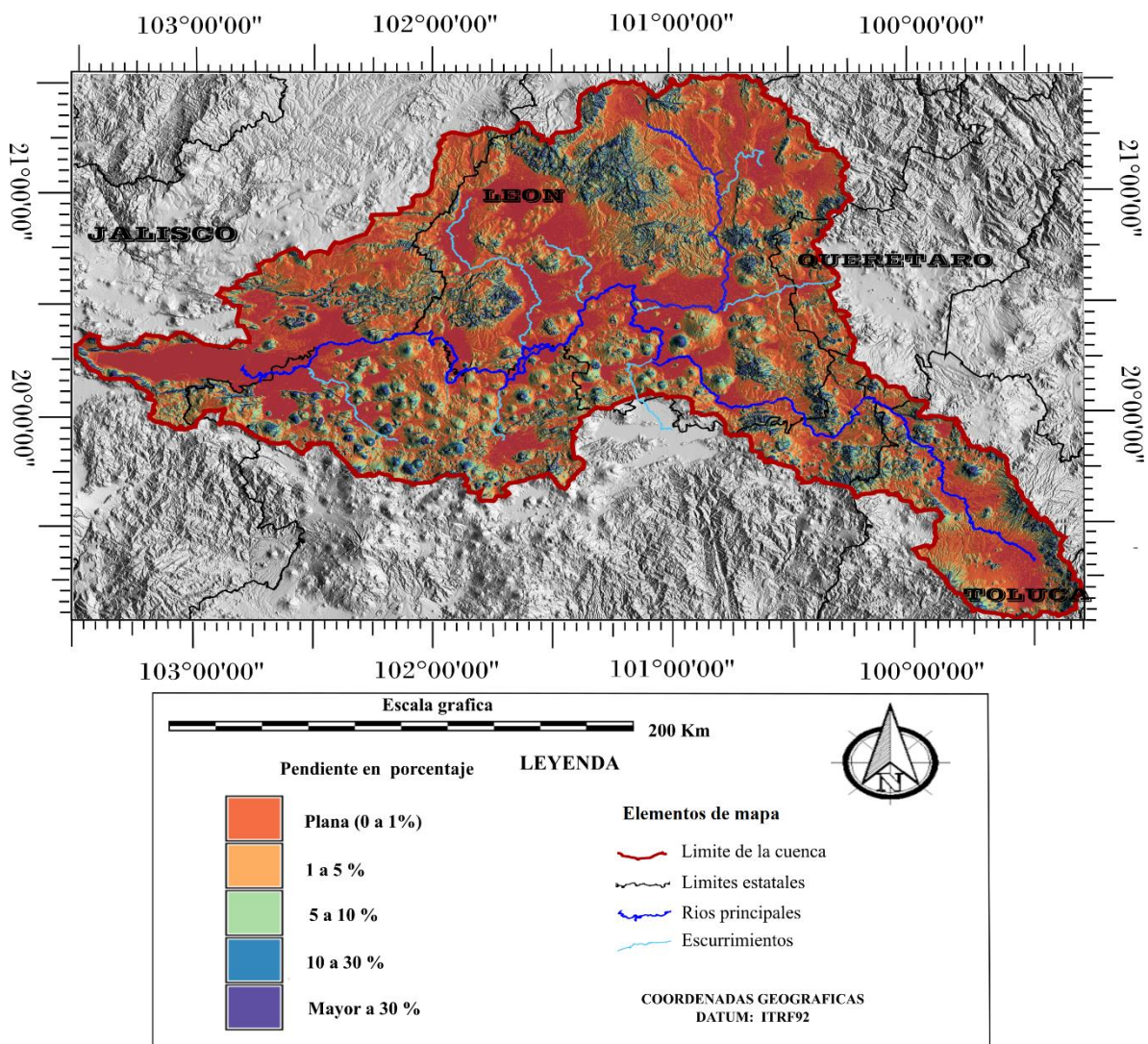


Fig. 23. Mapa de pendientes de acuerdo al modelo digital de elevación SRTM.

La cuenca presenta una pendiente baja (figura 23), a excepción de las áreas montañosas, donde se tienen pendientes superiores al 30 por ciento, sobre todo en las partes más altas de las montañas; a partir del 35% se presenta el mayor escurrimiento posible. La superficie con pendiente muy elevada es pequeña en comparación con el tamaño de la cuenca.

5. RESULTADOS

El resultado principal de este trabajo fue la obtención de la recarga potencial, así como cada uno de los raster para su obtención, siendo necesario el de precipitación (PP), evapotranspiración potencial (EPT) y escurrimiento (E), una vez que se obtuvieron estos fue posible aplicar la siguiente expresión para obtener la recarga potencial.

$$RP = PP - EPT - E \quad (1)$$

Se crearon tres mapas anuales de coeficientes de escurrimiento, donde se establece el coeficiente de acuerdo a la información de uso de suelo, tipo de suelo y pendiente de acuerdo a los índices de Kennessey.

Como se puede observar en la figura 24 la superficie de coeficiente de escurrimiento varía anualmente, por variables que se modifican cada año como el uso de suelo y el índice de aridez, los cuales durante los tres años fueron diferentes y poco perceptible por su tamaño, con respecto a la superficie de la cuenca.

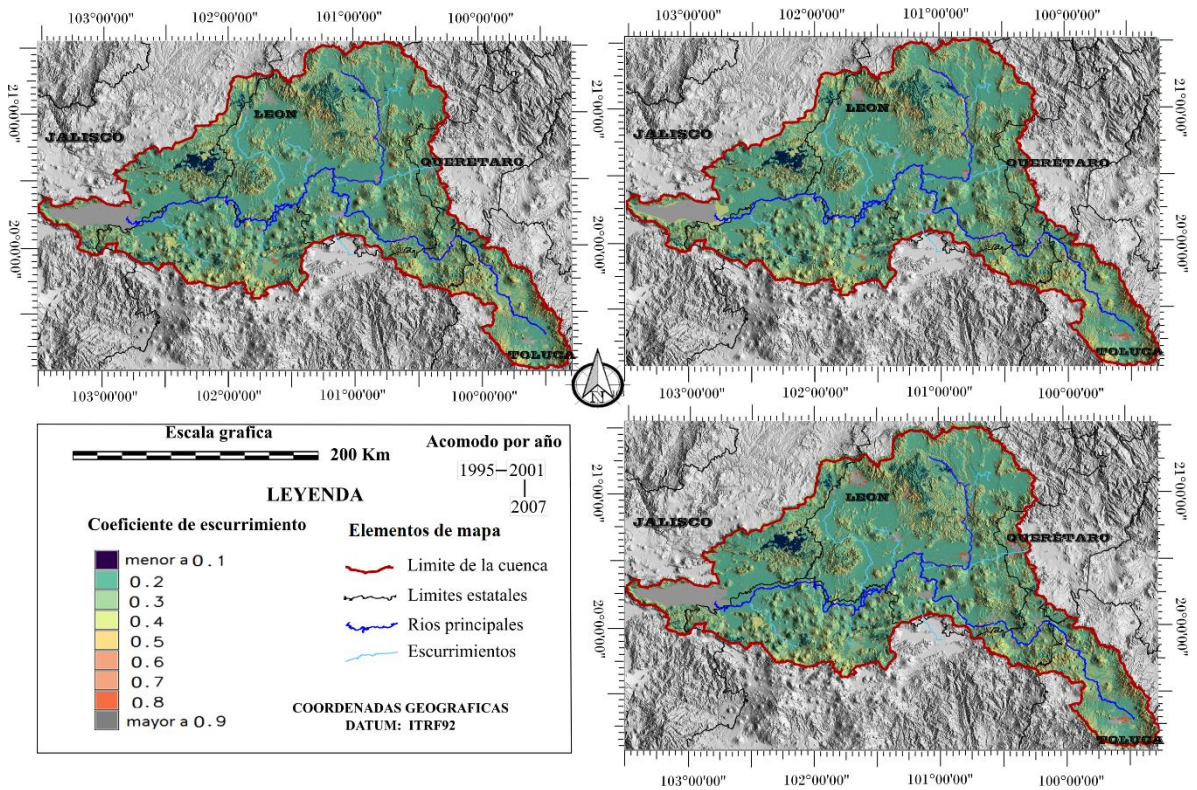


Fig. 24. Mapas de coeficiente de escurrimiento anual para el 1995, 2001 y 2007.

Considerando la variación espacial tanto del coeficiente de escurrimiento como de la precipitación, se obtuvieron 36 mapas de escurrimiento mensual (figuras 25, 26 y 27).

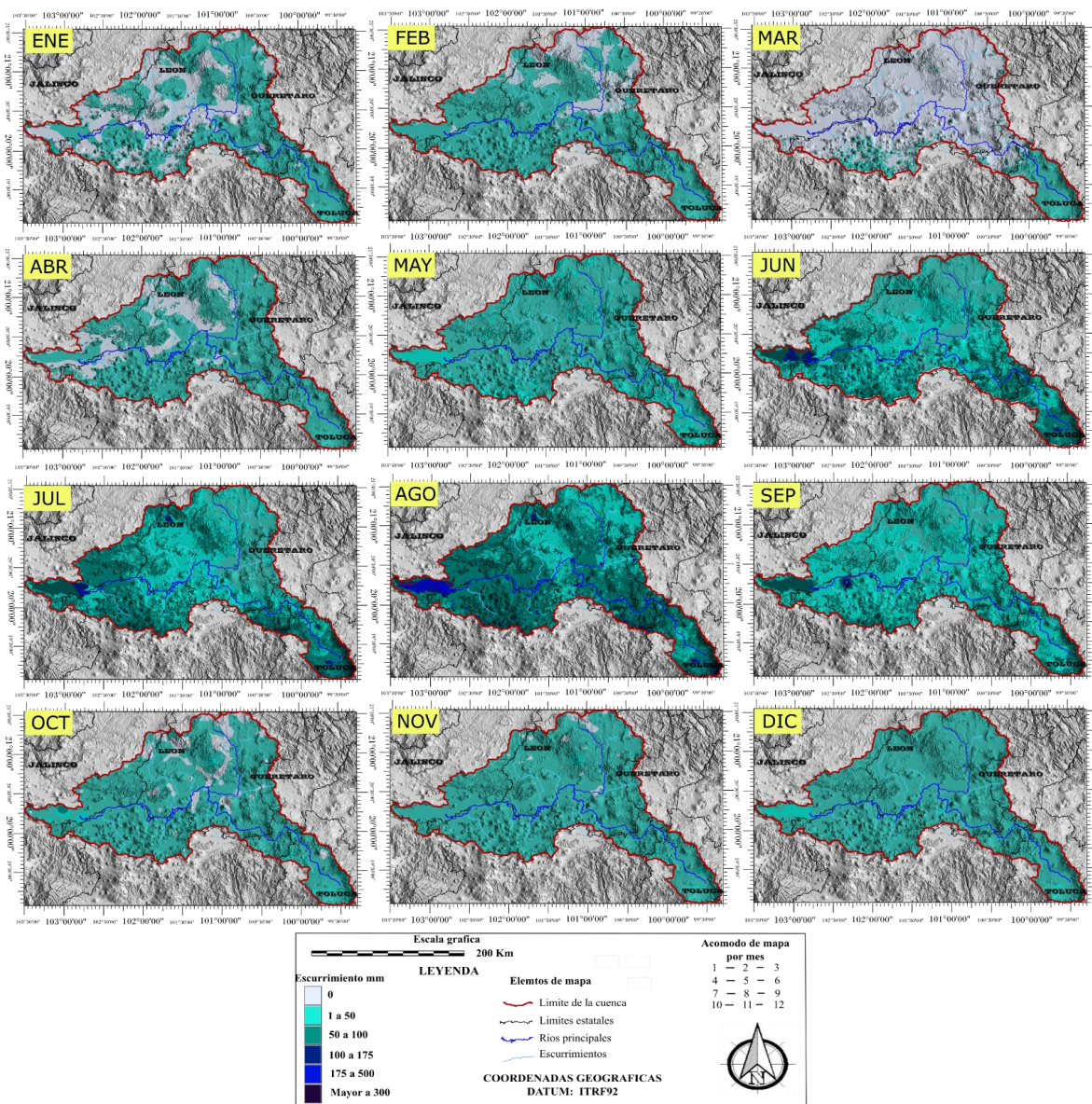


Fig. 25. Variación espacial de escurrimiento superficial para el año 1995.

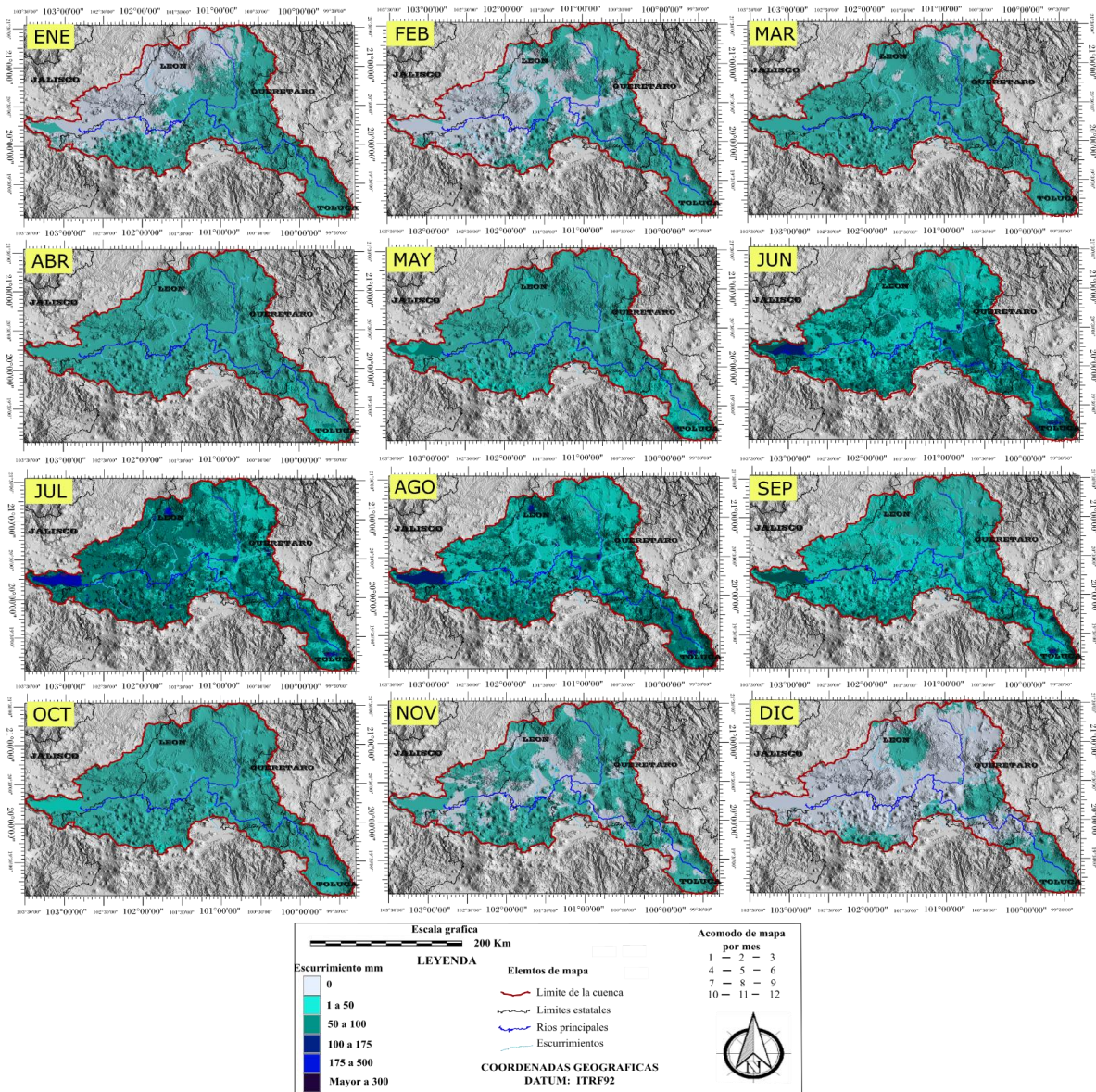


Fig. 26. Variación espacial de escurrimiento superficial para el año 2001.

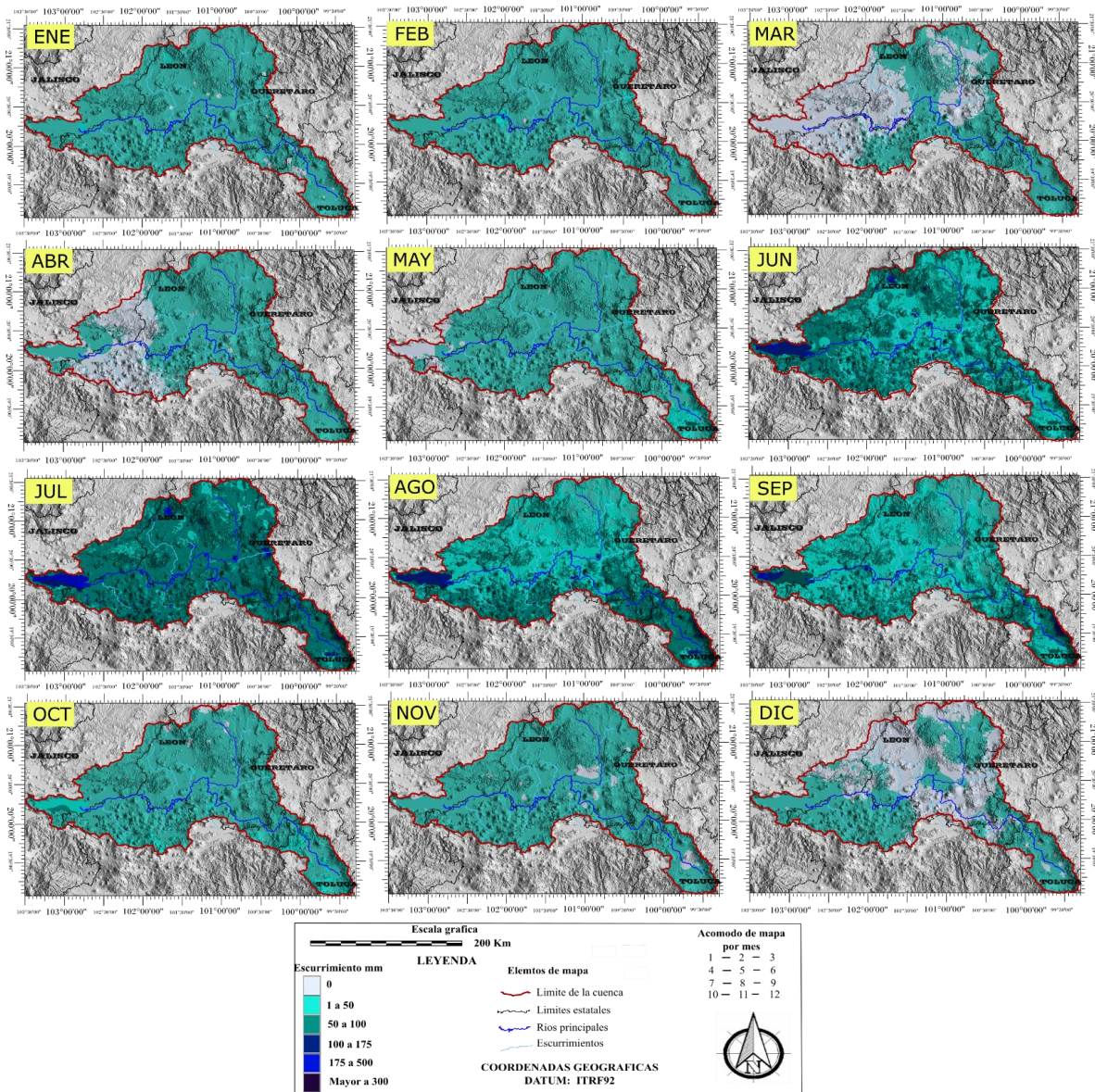


Fig. 27. Variación espacial de escurrimiento superficial para el año 2007.

Los valores de escurrimiento al estar en función de la precipitación fluctúan del mismo modo, ya que los meses de mayor escurrimiento son también los meses de mayor precipitación, y por el contrario los meses de menor precipitación, presentan los escurrimientos más bajos. El menor escurrimiento superficial fue en el año 1995 y para el 2007 se tuvo el mayor.

La evapotranspiración potencial se obtuvo usando los raster obtenidos de la interpolación de temperatura aplicando la siguiente formula:

$$ETP = 40.9 \times 0.611e^{\left(\frac{17.3T}{T + 237.3}\right)} \quad (7)$$

Donde T, se refiere al raster de temperatura.

De este modo se obtuvieron los 36 mapas de evapotranspiración potencial (figura 28, 29 y 30).

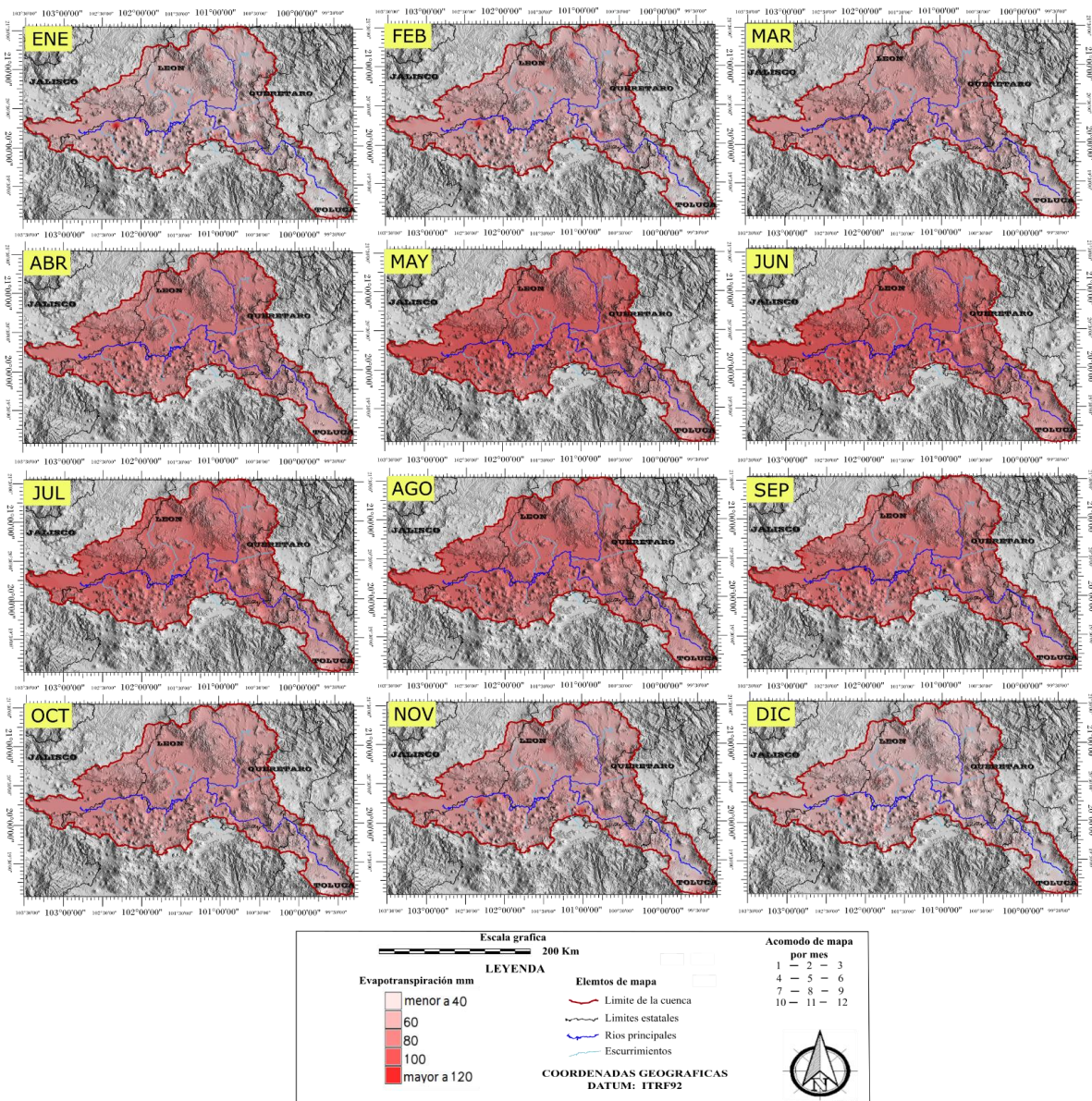


Fig. 28. Variación espacial de evapotranspiración superficial para el año 1995.

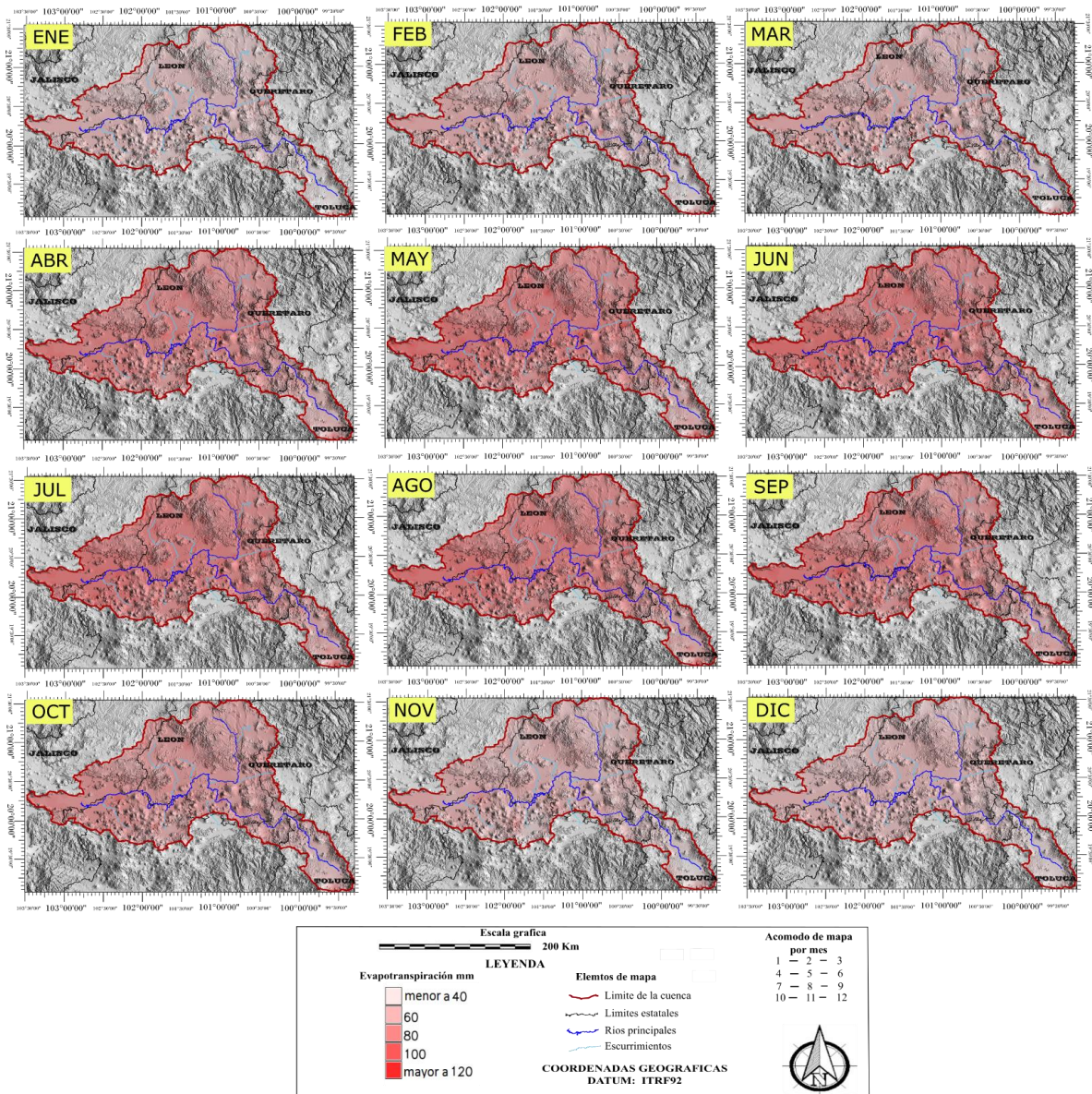


Fig. 29. Variación espacial de evapotranspiración superficial para el año 2001.

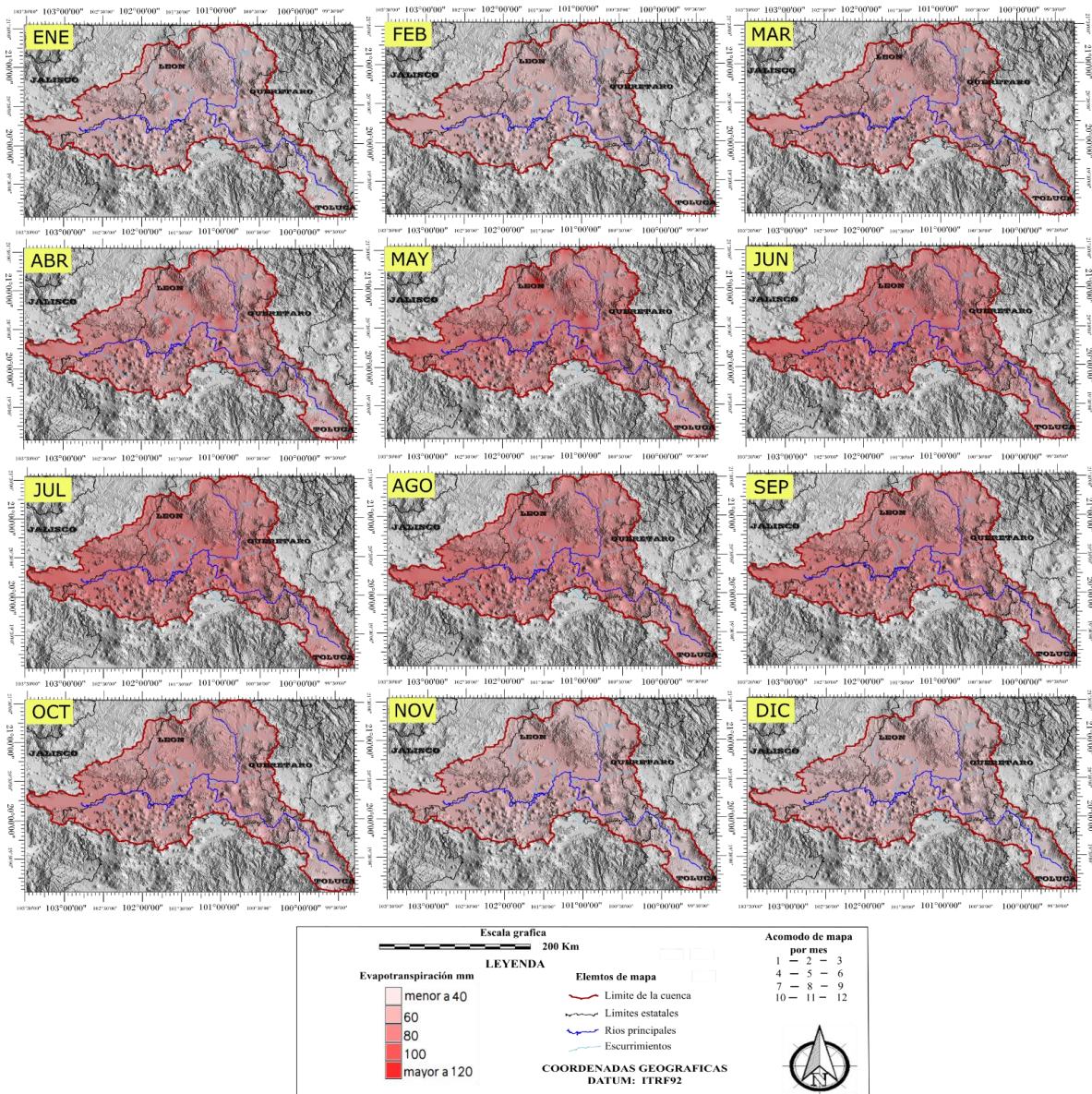


Fig. 30. Variación espacial de evapotranspiración superficial para el año 2007.

Una vez que se obtuvo la distribución espacial del escurrimiento, evapotranspiración y precipitación, se utilizó algebra de mapas para la obtención de la variación espacial de la recarga potencial, aplicando la expresión matemática de “ $RP = PP - EPT - E$ ” (ecuación 1). Con esto se obtuvo la distribución espacial de la recarga potencial a nivel mensual para los tres años considerados (figura 31, 32 y 33).

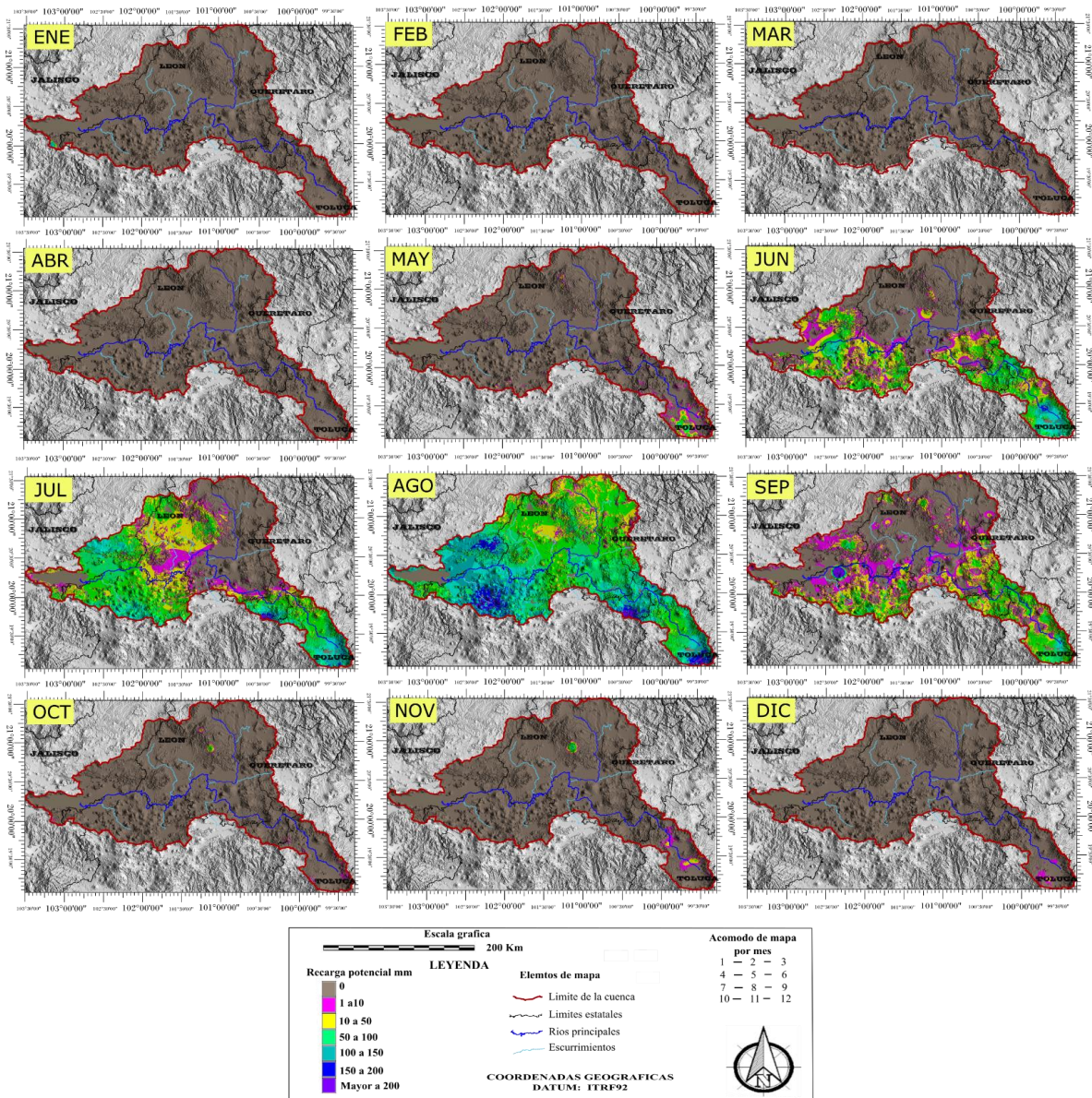


Fig. 31. Variación espacial de recarga potencial para el año 1995.

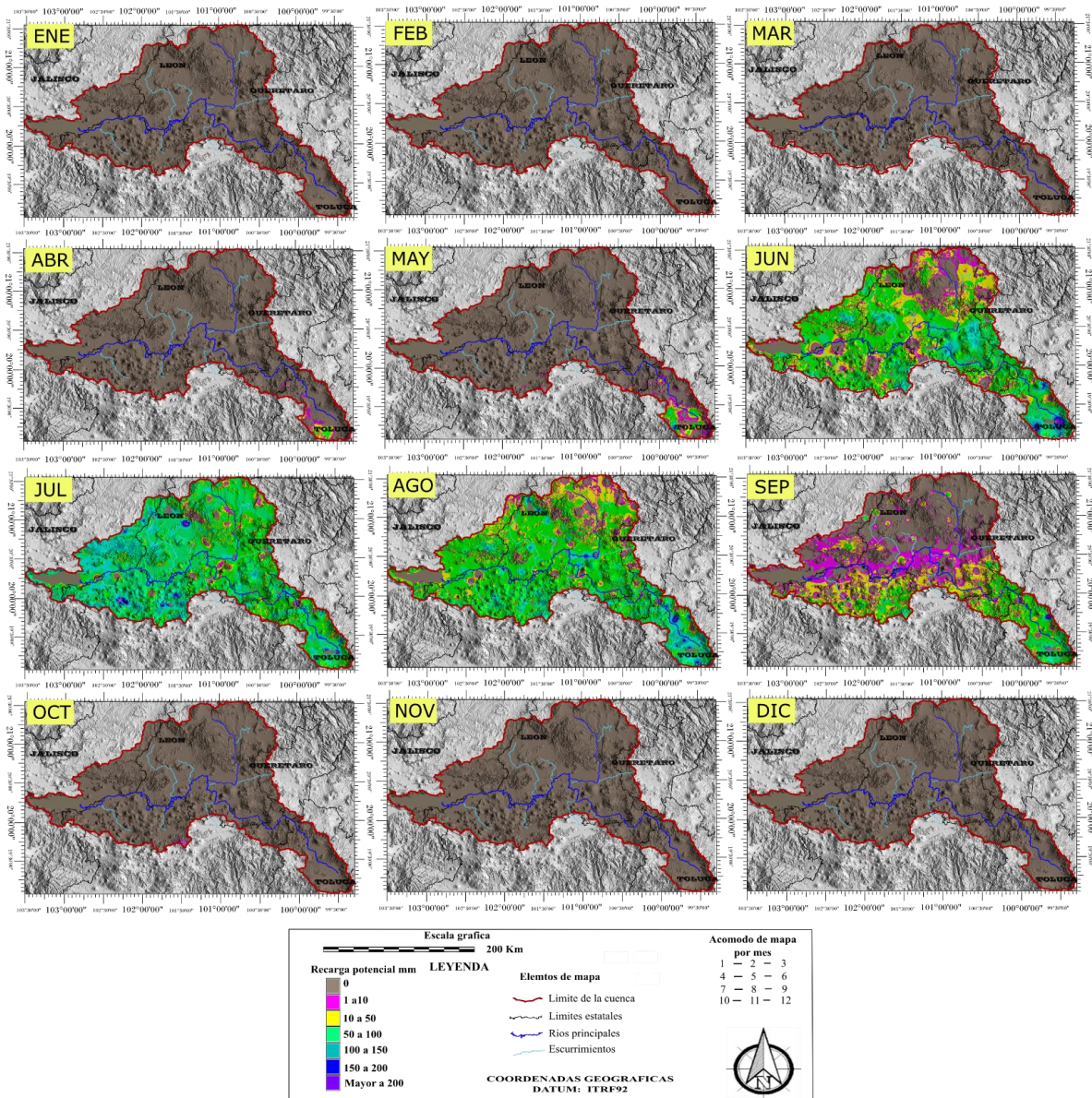


Fig. 32. Variación espacial de recarga potencial para el año 2001.

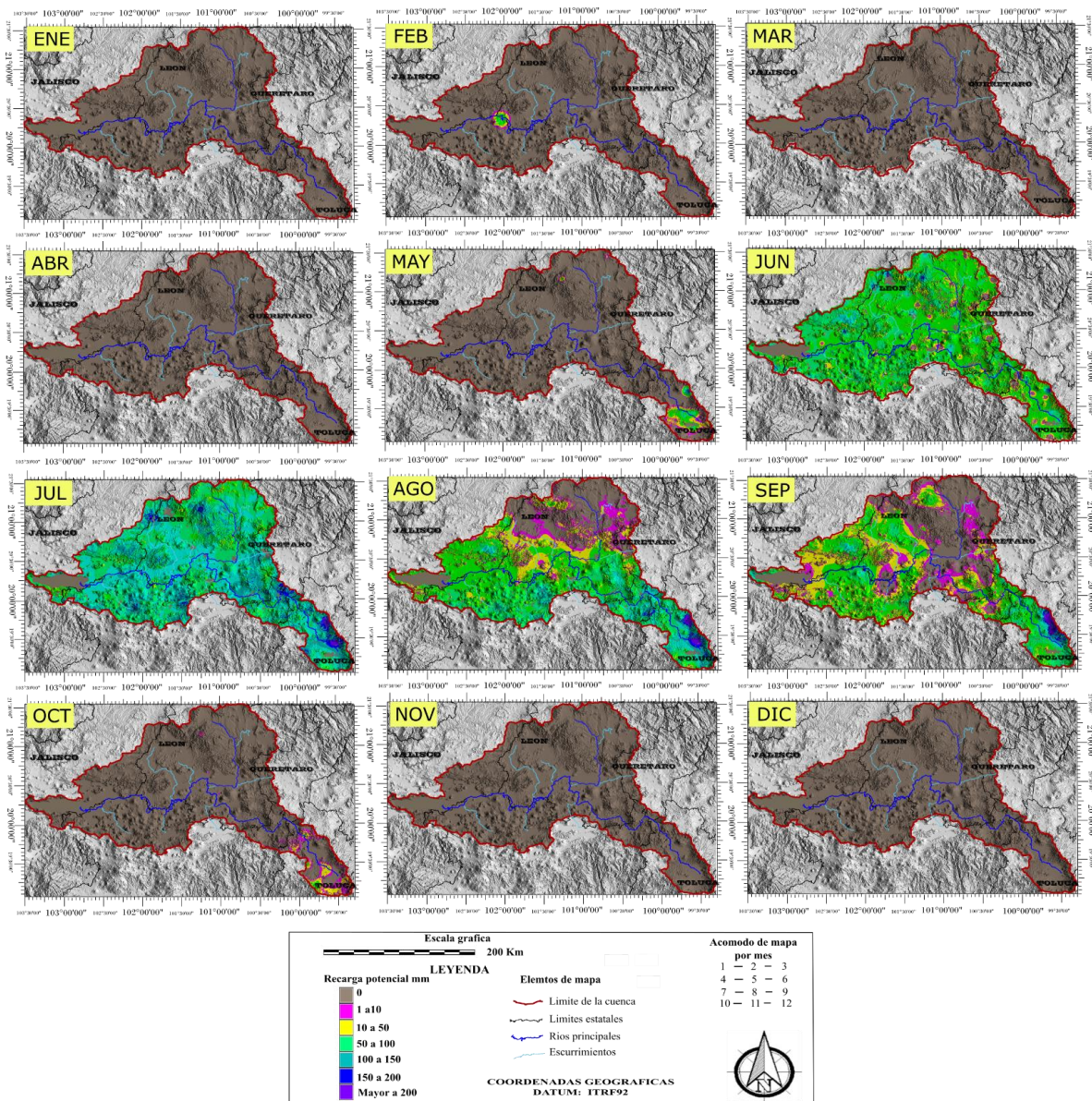


Fig. 33. Variación espacial de recarga potencial para el año 2007.

De acuerdo a la distribución espacial de la recarga potencial es posible observar que la mayor parte del año en la cuenca Lerma Chapala no se presenta recarga significativa, siendo hasta el mes de mayo que se presenta un poco de recarga, aumentando en los meses de junio, julio y agosto.

Para el año 1995 las altas temperaturas generaron elevadas tasas de evapotranspiración, y al mismo tiempo se presentó una precipitación más baja, lo que provocó que ese año haya sido el de menor recarga potencial en el estudio.

La recarga potencial es mayor en toda la cuenca solo en el mes de agosto, mientras que los otros meses se concentra en las partes altas.

Durante el año 2001 en los meses de junio, julio y agosto en general se presentó la mayor recarga potencial en toda la cuenca, aunque las tasas de recarga no fueron tan elevadas, como fue el mes de agosto de 1995 donde se tienen áreas con registros superiores a los 150 mm, del mismo modo que en el mes de julio de 2007.

La mayor recarga potencial se presenta en la región de Toluca en el Estado de México donde se tienen las mayores precipitaciones y las temperaturas más bajas.

Tabla 14. Resultados de escurrimiento, precipitación y recarga potencial, en Millones de metros cúbicos de agua en la cuenca.

Mes	1995			2001			2007		
	ES	PP	RP	ES	PP	RP	ES	PP	RP
Enero	146.3	394.3	6.4	67.4	185.1	0.0	277.2	742.6	0.0
Febrero	127.1	342.5	0.0	50.5	211.7	0.0	390.8	1,073.9	10.0
Marzo	35.1	92.7	0.0	200.7	544.7	0.0	88.1	239.4	0.0
Abril	151.6	408.1	0.0	426.9	1,171.0	11.8	174.2	469.4	0.0
Mayo	1,082.5	2,947.9	27.3	903.4	2,439.6	44.7	542.9	1,495.2	45.5
Junio	2,119.7	5,658.3	641.7	2,610.6	7,103.4	1,476.8	2,933.1	7,914.6	1,900.2
Julio	2,467.7	6,632.6	1,163.9	3,205.0	8,726.0	2,521.3	3,812.9	10,325.9	3,468.0
Agosto	3,575.1	9,641.3	2,761.6	2,767.5	7,528.3	1,759.8	2,698.2	7,219.0	1,637.7
Septiembre	1,951.7	5,275.0	512.6	1,862.2	5,047.5	513.0	2,210.6	5,926.6	1,048.1
Octubre	340.8	889.5	5.4	589.1	1,597.1	0.3	662.3	1,746.4	23.9
Noviembre	377.8	1,013.7	11.7	94.8	257.4	0.0	249.8	693.3	0.0
Diciembre	433.7	1,162.7	1.5	40.9	110.2	0.0	82.3	217.7	0.0
	12,809.0	34,458.8	5,132.2	12,819.1	34,922.0	6,327.7	14,122.5	38,063.8	8,133.5

ES: Escurrimiento, PP: Precipitación, RP: Recarga potencial

Durante el mes de julio para los años 2001 y 2007 se tiene una recarga acumulada mensual mayor que los demás meses, sin embargo, este patrón no se repite en el año 1995, ya que es en el mes de agosto cuando se tiene la mayor recarga y la mayor precipitación, es también durante este año cuando en los meses de noviembre y diciembre se presenta recarga, a diferencia de los años 2001 y 2007 que no presentan recarga durante esos meses.

En el estudio se obtuvo que para el año 2007 se presenta la mayor recarga potencial de la cuenca con un volumen de 8,133 millones de metros cúbicos, seguido del 2001 con una recarga potencial de 6,327 millones de metros cúbicos y la menor recarga se obtuvo en el año de 1995 con 5,132 millones de metros cúbicos.

En el año 1995 se presentó una alta temperatura en la cuenca durante la temporada de calor, además de presentarse retrasadas las precipitaciones, lo cual ocasionó que éste fuera el año con menor recarga potencial. Por el contrario, en el 2001 se observa muy regular el comportamiento de la precipitación y de la temperatura, lo cual ocasionó que se tuviera una recarga potencial mayor.

También se puede ver que en los años 1995 y 2001 la precipitación y el escurrimiento superficial fueron muy similares; sin embargo, la recarga potencial fue mucho mayor en 2001, lo cual nos indica que el principal factor para esta diferencia fue la alta evapotranspiración potencial ocasionada por las altas temperaturas de 1995.

Así el 2007 fue un año con la más alta presencia de precipitación como se observa en la figura 33, por lo cual se tuvo una muy elevada recarga potencial, además de concentrarse la precipitación principalmente en el mes de julio, haciendo que la recarga potencial fuera lo doble que para el mismo mes del año 1995. Esto indica que se tiene una mayor recarga potencial cuando la precipitación es alta y se concentra en pocos meses, que cuando se distribuye en más meses con una precipitación no tan elevada.

La variación en el tiempo de los factores puede afectar las tasas de recarga, por lo tanto, un cambio en los regímenes de temperatura y precipitación ocasionados por el cambio climático global puede modificar la recarga de acuíferos (Herrmann et al., 2016).

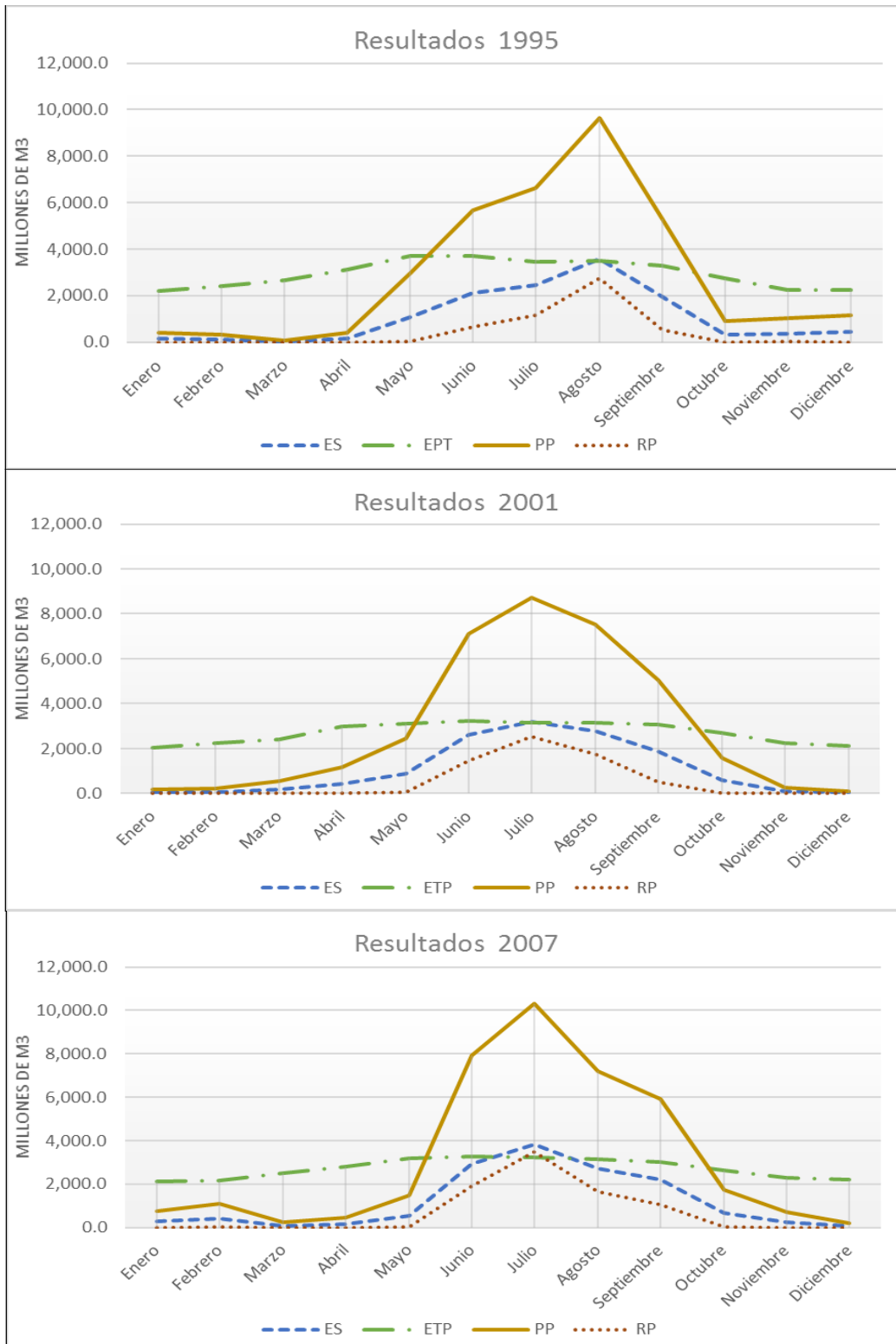


Fig. 34. Resultados anuales obtenidos donde “ES” se refiere al Escorrentía, “ETP” es Evapotranspiración potencial, “PP” es Precipitación y “RP” es Recarga potencial.

La mayor recarga potencial se presenta durante el mes que tiene una mayor precipitación, sin embargo, este puede variar como se observa en la figura 34, ya que para el 2001 y 2007 se presentó en julio y para el 1995 en el mes de agosto.

La tasa mensual de agua que es captada como recarga potencial en el estudio, en los tres años es menor que la tasa de escurrimiento, mientras que la evapotranspiración es mayor que la recarga potencial en todos los meses del año para 1995 y 2001, sin embargo, la recarga potencial fue mayor a la tasa de evapotranspiración que supero la precipitación mensual cuando esta fue mayor de 10,000 millones de metros cúbicos.

La tasa de escurrimiento superficial alcanza la tasa de evapotranspiración solo cuando la precipitación es muy alta en la cuenca, en este caso puede ser mayor el escurrimiento que la evapotranspiración, como se puede ver en el año 2007.

En el año 1995 se tuvo el menor porcentaje de agua captada para recarga potencial siendo solo 14.9% del total de la precipitación, para el 2001 la recarga potencial fue más alta alcanzando el 18.1%, mientras que en el 2007 se tuvo la mayor recarga potencial del estudio con un 21.4%.

La tasa de evapotranspiración potencial en el año 1995 fue de 102% de la precipitación total, para 2001 fue de 93.1% y en el 2007 fue 85.4%, sin embargo, durante los meses que no se presenta precipitación no hay humedad suficiente. Este es uno de los problemas que se presentan para los cálculos de recarga anual, pues la evapotranspiración muchas veces es tan alta como la misma precipitación, además si se considera el escurrimiento, no sería posible estimar recarga alguna.

De acuerdo a los estudios anteriormente realizados en la cuenca Lerma Chapala se calculaba según varios autores una recarga potencial anual de 3,980 millones de m³ (Levine, 2007), 4,126 millones de m³ (CONAGUA, 2012) y más de 20,000 millones de m³ (Pladeyra, 2000). Sin embargo, en este estudio los resultados arrojan valores de 5,132.2 millones de m³ para el 1995, 6,327.7 millones de m³ para el 2001 y 8,133.5 millones de m³ durante el 2007.

La diferencia en los resultados anteriores es ocasionada porque en dichos estudios se consideran valores anuales regionales de precipitación, temperatura y evapotranspiración, además de utilizar información procesada, sin generar información propia. Por el contrario,

en este estudio se consideró la variación espacial de las variables climatológicas a nivel mensual y se consideraron los diferentes tipos de vegetación, suelos y pendientes. Algo que no se pudo realizar fue la validación del escurrimiento superficial, ya que es imposible de hacerlo en la zona de estudio, debido a que gran parte del volumen de agua que escurre se encuentra almacenada en embalses y presas.

Por otro lado, el cambio de uso de suelo ha sido constante como se observa en la tabla 15, aumentando la superficie agrícola y sin vegetación, y disminuyendo considerablemente la superficie con pastizal y matorral, así como los bosques.

Tabla 15. Uso de suelo y vegetación en los años del estudio, de acuerdo al INEGI.

Uso de suelo	1995 km²	2001 km²	2007 km²
Sin Vegetación	2,366.64	2,184.12	2,625.65
Pastizal y matorral	8,636.80	8,207.43	7,552.32
Agrícola	25,897.46	26,672.21	27,294.33
Bosque	11,229.10	11,066.25	10,657.70

El uso de suelo “sin vegetación” es la que presenta una superficie menor durante todo el periodo de estudio, demostrando que crecimiento de la zona urbana no ha sido tan grande en comparación con la agricultura. Esta categoría también incluye los cuerpos de agua, por lo cual en el 2001 esta se redujo aparentemente, debido a la reducción del volumen de agua del Lago de Chapala.

6. CONCLUSIONES

La precipitación es el factor determinante para la recarga potencial, por lo tanto, cuanto mayor es la precipitación mensual en el área de estudio, mayor será la recarga potencial.

El cambio de uso de suelo durante el período considerado (1995 — 2007), está representado por el cambio de zonas forestales a agrícolas y el aumento de la mancha urbana. Sin embargo, debido a que las zonas de recarga se encuentran en zonas altas donde ha sido menor el cambio de uso de suelo, este cambio no ha disminuido la recarga potencial.

Este estudio muestra que el principal problema que presenta el crecimiento urbano y cambio de uso de suelo, no es la disminución de recarga potencial, sino el alto consumo de agua superficial y subterránea, así como su contaminación.

En los estudios realizados en la cuenca por CONAGUA (2007), Levine (2007) y Pladeyra (2000), se calcula una recarga de 4,126, 3,980 y 20,000 millones de metros cúbicos anuales respectivamente, lo cual nos demuestra que las estimaciones que se han realizado no reflejan correctamente lo que ocurre en la cuenca, pues al usar una metodología que no toma en cuenta las variaciones espaciales a nivel mensual de la temperatura y precipitación, se considera una tasa fija de recarga anual, lo cual no ocurre en la realidad. De forma adicional, los estudios realizados con anterioridad no han considerado otros factores que influyen en la recarga potencial, como el tipo de suelo, vegetación y pendiente del terreno.

En las estimaciones de la recarga potencial, se obtuvo que la mayor recarga potencial se presentó en el año 2007 y la menor en el año 1995. La causa de estas variaciones es el resultado de la ola de calor que ocurrió en el año 1995 y las elevadas precipitaciones del 2007, por lo tanto, los factores climáticos que ocurren durante el año modifican las tasas de recarga potencial y pueden ser atípicos.

El procedimiento aplicado en el presente trabajo puede ser una herramienta de gran utilidad para el manejo de los recursos hídricos en la cuenca Lerma-Chapala.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abel, S. et al., 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma*. 202–203, pp.183–191.
- Abrol, I. P., B.K., K. and Bhumbra, D. R., 1969. Relationship of texture to some important soil moisture constants. *Geoderma*. 8, pp. 33–39.
- Allen, R. G. et al., 2006. Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. 323 p.
- Andrew, C., Comrie, A. C. and Glenn, E. C., 1999. Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*. 10(3), pp. 201–215.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R. and Nikbakht, A. M., 2014. SAWCal: A user-friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier B.V. 109, pp. 86–93.
- Batjes, N. H., 1996. Development of a world data set of soil water retention properties using pedotransfer rules. *Geoderma*. 71(1–2), pp. 31–52.
- Bolstad, P., 2005. GIS fundamentals. Eider Press. USA. 777 p.
- Burrough, P. A. and McDonnell, R. A., 1998. Data models and axioms: formal abstractions of reality. *Principles of geographical information systems*. pp. 17–34.
- Cai, Z. and Offerdinger, U., 2016. Analysis of groundwater-level response to rainfall and estimation of annual recharge in fractured hard rock aquifers, NW Ireland. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. 535, pp. 71–84.
- Carrera-Hernández, J. J. and Gaskin, S. J. 2008. Spatio-temporal analysis of potential aquifer recharge: Application to the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*. 353(3–4), pp. 228–246
- Carrera-Hernández, J. J. 2013. Kriging yearly precipitation at the national level across different climates: importance of semivariogram modelling and stratification. *Centro de Geociencias*. (December), pp. 1–40.
- Carrera-Hernández, J. J. and Gaskin, S. J. 2006. The groundwater modeling tool for GRASS (GMTG): Open source groundwater flow modeling. *Computers and Geosciences*. 32(3), pp. 339–351.

- Carrera-Hernandez, J. J. and Gaskin, S. J. 2007. Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*. 336(3–4), pp. 231–249.
- Carrera-Hernández, J. J. and Gaskin, S. J. 2008. The Basin of Mexico Hydrogeological Database (BMHDB): Implementation, queries and interaction with open source software. *Environmental Modelling and Software*. 23(10–11), pp. 1271–1279.
- Carrera-Hernández, J. J. et al., 2016. Groundwater flow in a transboundary fault-dominated aquifer and the importance of regional modeling: the case of the city of Querétaro. Mexico. *Hydrogeology Journal*. 24(2), pp. 373–393.
- CEA, 2017. Comisión Estatal de agua Jalisco, Consultado desde el sitio: <https://www.ceajalisco.gob.mx/contenido/chapala/>
- CENAPRED, 2004. Guía básica para la Elaboración de Atlas estatales y Municipales de peligros y Riesgos,
- Cobos, I. P. W. P., 2015. Implementación en Grass-Gis de técnicas de fusión de imágenes digitales. Universidad de Cuenca Resumen. 107 p.
- Comrie, A. C. and Glenn, E. C., 1999. Principal components-based regionalization of precipitation regimes across the southwest United States and northern Mexico, with an application to monsoon precipitation variability. *Climate Research*. 10(3), pp. 201–215.
- CONAGUA, 2012. Lerma - Chapala Basin Case Study Mexico A fruitful sustainable experience, Prepared for the 4th UN World Water Development Report Managing water under uncertainty and risk 2012. CONABIO. pp. 1–28.
- CONAGUA, 2007. Programa nacional de acción contra la degradación de las tierras (desertificación) y mitigación de los efectos de la sequía. 2007-2030, 255 p
- Cotler, H. and Gutiérrez, S., 2005. Inventario y evaluación de presas de la Cuenca Lerma-Chapala. Instituto Nacional de Ecología. pp. 1–16.
- Crawley, M. J., 2007. *The R Book*, John Wiley & Sons Ltd. Inglaterra. 192 p.
- Cressie, N., 1993. *Statistics for spatial data*. Iowa State University. 424 p.
- de Vries, J. J. and Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: An overview of process and challenges, *Hydrogeology Journal*. 10(1), pp. 5–17.
- Díaz, M. A., 2002. *Geoestadística aplicada*. Instituto de Geofísica. 144 p.
- Dingman, S.L., 2002. *Physical Hydrology*. 2nd Edition, Prentice Hall. Upper Saddle River. 646 p.

- Dugan, J. T. and Peckenpaugh, J. M., 1985. Effects of climate, vegetation, and soils on consumptive water use and ground-water recharge to the central midwest regional aquifer system. Water-Resources Investigations Report 85-4236 Lincoln. Nebraska. U.S. Geological Survey Water-Resources. 78 p.
- Durán, J. M. and Torres, A., 2003. Crisis ambiental en el Lago de Chapala y el abastecimiento para Guadalajara. e-Gnosis. 1(Art 6), pp. 1–13.
- Escamilla, J. M., 2010. Manual Introductorio a los Sistemas de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto con Aplicación a Dinámicas Biológicas Espaciales. Universidad Nacional Autónoma de México. 142 p.
- FAO, 2007. Secuestro de Carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales, p.138.
- Freeze, R. A. and Banner, J., 1970. The mechanism of natural ground-water recharge and discharge; U.S. Geol. Survey Water Resources Research. 6(1.), pp. 138–155.
- Ghiglieri, G., Carletti, A. and Pittalis, D., 2014. Runoff coefficient and average yearly natural aquifer recharge assessment by physiography-based indirect methods for the island of Sardinia (Italy) and its NW area (Nurra). Journal of Hydrology. Elsevier B.V. 519(PB), pp. 1779–1791.
- Giddings, L. et al., 2005. Standardized precipitation index zones for México. Atmosfera. 18(1), pp. 33–56.
- Goovaerts, P., 1999. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. Geoderma. 89(1–2), pp. 1–45.
- GRASS development team, 2017. GRASS GIS software. U.S. Recuperado de: <https://grass.osgeo.org/>
- Haberlandt, U., 2007. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. Journal of Hydrology. 332(1–2), pp. 144–157.
- Henríquez, C. et al., 2005. La geostadística en el estudio de la variación espacial de la fertilidad del suelo mediante el uso del interpolador kriging. Agronomía Costarricense. 29(2), pp. 73–81.
- Herrmann, F. et al., 2016. Simulation of future groundwater recharge using a climate model ensemble and SAR-image based soil parameter distributions - A case study in an intensively-used Mediterranean catchment. Science of the Total Environment. 543, pp.889–905.

- Huggel, C. et al., 2008. Evaluation of ASTER and SRTM DEM data for lahar modeling: A case study on lahars from Popocatepetl Volcano. Mexico. 170, pp. 99–110.
- Huisman, O. and De By, R. A., 2009. Principles of Geographic Information Systems An introductory textbook. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. 540 p.
- INEGI, 2004. Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología, Instituto Nacional de Estadística. Geografía e Informática. 27 p.
- Kim, J. H. and Jackson, R. B., 2012. A Global Analysis of Groundwater Recharge for Vegetation, Climate, and Soils. *Vadose Zone Journal*. 11(1), p. 0-35.
- Lerner, D. N., 1990. Groundwater recharge in urban areas, *Atmospheric Environment*. Part B. *Urban Atmosphere*. 24(1), pp. 29–33.
- Levine, G., 2007. The Lerma-Chapala river basin: A case study of water transfer in a closed basin, *Paddy and Water Environment*. 5(4), pp. 247–251.
- López, Q. P. et al., 2009. Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*. Elsevier B.V. 69(1), pp.
- Maliva, R. G. and Missimer, T. M., 2012. *Arid Lands Water Evaluation and Management, Environmental Science and Engineering*. 3, pp. 21–39.
- Malmström, V. H., 1969. A New Approach To The Classification Of Climate. *Journal of Geography*. 68(6), pp. 1–12.
- Meixner, T. et al., 2016. Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States, *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. 534, pp. 124–138.
- Mercado-Mancera, G. et al., 2010. Calibración y aplicación del índice de aridez de De Martonne para el análisis del déficit hídrico como estimador de la aridez y desertificación en zonas áridas. 26(1), pp. 51–64.
- Mestre Rodríguez, J. E., 1997. Case Study VIII - Lerma-Chapala Basin, Mexico, *Water Pollution Control. A Guide to the Use of Water Quality Management Principles*. 15, p.
- Murayama, Y., 2012. *Progress in Geospatial Analysis*. Division of Spatial Information Science. University of Tsukuba. Tsukuba, Ibaraki, Japan. 291, p.
- Neteler, M. and Mitasova, H., 2008. *Open source gis a GRASS GIS Approach*. Third Edition. Springer. 417 p.

- Neteler, M. et al., 2012. GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS, *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd. 31, pp. 124–130.
- Niemann, J. D. and Eltahir, E. A. B., 2004. Prediction of regional water balance components based on climate, soil, and vegetation parameters, with application to the Illinois River Basin. *Water Resources Research*. 40(3), pp. 0–14.
- Nikolakopoulos, K. G., Kamaratakis, E. K. and Chrysoulakis, N., 2016. SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing (ISSN)*. 1161(October).
- Pebesma, E. J., 2004. Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Computers and Geosciences*. 30(7), pp. 683–691.
- PLADEYRA (2000) Paisajes hidrológicos y balance hídrico de la cuenca Lerma-Chapala. Instituto Nacional de Ecología. pp. 1–135.
- Robinson, M., 1992. *Methods of hydrological basin comparison*. University of Oxford. (120), p. 209.
- R Development Core Team, 2017. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Recuperado de: <https://www.r-project.org/>
- Rushton, K. R., Eilers, V. H. M. and Carter, R. C., 2006. Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation, *Journal of Hydrology*, 318(1–4), pp. 379–399.
- Rzedowski, J. 1988. *La vegetación de México*. Limusa. México.
- Santos, I., 2004. Los afanes y las obras. La Comisión Lerma Chapala Santiago. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*. pp. 29–38.
- Scanlon, B.R., Healy, R.W. and P.G. Cook, 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydro- geology J*. 10, 18-39.
- Scott, C. A. and Ochoa, P, S., 2001. Collective action for water harvesting irrigation in the Lerma-Chapala Basin, Mexico., *Water Policy*, 3, pp. 555–572.
- Scott, A. C. et al., 2001. Competition for water in the Lerma-Chapala basin: Economic and Policy Implications of Water Transfers from Agricultural to Urban Uses. *The Lerma-Chapala Watershed*. pp. 291–323.
- Seiler, K. P. and GAT, J. R., 2012. groundwater recharge from run-off, infiltration and percolation. *Water Science and Technology Library*. 257 p.

- Sherman G. E. et al., 2007. Quantum GIS: Guía de Usuario e Instalación. Quantum GIS Project. 189 p.
- Sophocleous, S. et al., 2015. Advances in water mains network modelling for improved operations, *Procedia Engineering*. Elsevier B.V. 119(1), pp. 593–602.
- Spadoni, M. et al., 2010. Using GIS for modelling the impact of current climate trend on the recharge area of the S. Susanna spring (central Apennines, Italy) M. *HYDROLOGICAL PROCESSES*. 2274(November 2008), pp. 2267–2274.
- Sublime Tex development team, 2017. Sublime Text, Recuperado de: <https://www.sublimetext.com/3>.
- Szabó, G., Kumar, S. and Szabó, S., 2015. Slope angle and aspect as influencing factors on the accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM databases. 84, pp. 137–145.
- Team, R. D. C., 2000. Introducción a R. Notas sobre R: Un entorno de programación para Análisis de Datos y Gráficos. Venables Copyright c R. Gentleman & R. Ihaka Copyright c. 1, p. 106.
- Tom, G. et al., 2008. The Shuttle Radar Topography Mission, SRTM, pp. 1–43.
- Vélez, A. S., García, R. M. and Palma, A., 2003. La Cuenca Hidrográfica, SEMARNAT. 49 p.
- Waller, P. and Yitayew, M., 2015. Irrigation and drainage engineering, *Irrigation and Drainage Engineering*. 742 p.
- Walton, W. C., 1965. Ground Water Recharge and Runoff in Illinois. Report of Investigation 48., State Water Survey Division. 62 p.
- Wenzuo, Z. et al., 2005. Distribution of available soil water capacity in China, *Journal of Geographical Sciences*, 15(1), pp. 3–12.
- Wester, P., Burton, M. and Mestre, R. E., 2001. Managing the Water Transition in the Lerma-Chapala Basin, Mexico. *Intersectoral Management of River Basins*. (1996), pp. 161–181.
- Wilson, J. L. and Guan, H., 2004. Mountain-Block Hydrology and Mountain-Front Recharge. *Water Sci. and Appl. Groundwater Recharge in a Desert Environment: The Southwestern United States*. pp. 1-27.
- Zhang, L., Dawes, W. R. and Walker, G. R., 1999. Catchment hydrology predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance Predicting the effect of vegetation changes on, *Cooperativa Research Centre for Catchment Hydrology*, 12, p. 42