



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería
Centro Interamericano de Recursos del Agua



Cuantificación de la recarga regional bajo cambios temporales del uso de suelo por deforestación e incremento de la superficie urbana

Tesis

Que para obtener el
grado de Maestra en
Ciencias del Agua

Presenta

L.C.A Karina Pacheco Ortega

Director de Tesis

Dr. Jaime Garfías Soliz

Toluca, México Junio 2012

Resumen

El agua subterránea constituye una de las fuentes hídricas principales para el consumo humano e industrial en la cuenca del Valle de Toluca. El crecimiento de la población e industrial son problemas que atañen la sobreexplotación de agua potable en el mundo.

Teniendo como antecedentes la extracción excesiva de agua para saciar las necesidades hídricas del crecimiento urbano e industrial y las alteraciones al entorno natural; en la presente investigación se plateo como objetivo principal estimar la recarga regional del acuífero del valle de Toluca bajo cambios temporales por deforestación e incremento de la superficie urbana, considerando los parámetros hidrogeológicos y meteorológicos, para analizar la influencia de estos cambios temporales en la tasa de recarga; se evaluó la tasa de recarga para tres años de estudio 1985-1996-2009. Por lo que, se realizó el análisis y se preparo la base de datos de la precipitación y temperatura. Posteriormente se trabajó con imágenes de satélite para hacer la evaluación del uso del suelo y de ello evaluar el escurrimiento natural y la evapotranspiración real en la cuenca.

Del procesamiento de la información se obtuvo una tasa de recarga por precipitación para 1985 de 302.1 Hm^3 , mientras que en 1996 esta osciló en 258.3 Hm^3 y para el 2009 la recarga fluctuó en 335.1 Hm^3 . En el capítulo de resultados se puede apreciar las figuras de la distribución de la recarga; ésta ocurre en las partes altas que limitan la cuenca (Sierra de las Cruces y volcanes Guadalupeana y Nevado de Toluca).

Abstrac

Groundwater is one of the main water sources for human consumption and industrial use in the basin of valley of Toluca. The growth of the population and industry are problems of overexploitation on the aquifer water. For such growth the basin has been modified in their natural environmental.

Having as background the excessive extraction of water to satisfy both the water needs of urban and industrial growth and the alteration of the natural environment. The main objective of this research is to estimate the regional recharge on the Toluca valley aquifer, based on urban growth and deforestation; taking into account hydrological and meteorological parameters to analyze the influence of these temporal recharge rates. First, three years of study (1985, 1996 and 2009) were assessed. The analysis was done and the data base about precipitation and temperature was prepared. After that, the land use was assessed with satellite images in order to evaluate the natural runoff and the evapotranspiration in the natural basin.

From the information process it was obtained a recharge rate of 302.1 Hm^3 in 1985; in 1996 the recharge was 258.3 Hm^3 and in 2009 the recharge was 335.1 Hm^3 . In the chapter the results it is possible to see the figures on the recharge distribution. This happens in the high parts that limit the basin (Sierra de las Cruces and volcanos Nevado de Toluca and Guadalupe).

Contenido de la tesis

Capítulo I

Análisis de los recursos hídricos y su relación y su relación con el régimen de recarga

| | | |
|-------|---|---|
| 1.1 | Introducción | 2 |
| 1.2 | Antecedentes del uso del agua potable | 3 |
| 1.2.1 | El agua subterránea en México | 3 |
| 1.2.2 | Usos consecutivos del agua subterránea en la cuenca del valle de Toluca | 4 |
| 1.2.3 | Extracción hídrica en la cuenca del Valle de Toluca | 5 |
| 1.2.4 | Técnicas más utilizadas para estimar la tasa de recarga | 5 |
| 1.3 | Objetivos y Alcances | 8 |
| 1.3.1 | Objetivo general | 8 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos | 8 |
| 1.4 | Contenido de la tesis | 9 |

Capítulo II

Condiciones hidrogeológicas del acuífero volcánico del valle de Toluca

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1 | Introducción | 10 |
| 2.2 | Generalidades de la cuenca del valle de Toluca | 11 |
| 2.3 | Características hidrogeológicas de la zona de estudio | 12 |
| 2.3.1 | Localización geográfica | 12 |
| 2.3.2 | Fisiografía del acuífero | 13 |
| 2.3.3 | Geología en la cuenca | 14 |
| 2.3.4 | Características hidrogeológicas | 14 |
| 2.4 | Hidrología de la zona de estudio..... | 18 |
| 2.4.1 | Hidrografía del acuífero | 18 |
| 2.4.2 | Hidrometeorología en la cuenca | 20 |
| 2.5 | Estudios previos de estimación de recarga en el acuífero | 20 |
| 2.6 | Síntesis de los estudios previos | 24 |

Capítulo III

Factores y estimación de la recarga regional en regiones sub-humedas

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1 | Introducción | 25 |
| 3.2 | Métodos para estimar la recarga | 26 |
| 3.2.1 | Métodos de trazadores | 26 |
| 3.2.2 | Técnicas de medición directa | 27 |
| 3.2.3 | Métodos hidrodinámicos | 28 |
| 3.2.4 | Sistemas de Información Geográfica (SIG) | 28 |
| 3.2.5 | Balance de masas..... | 29 |
| 3.2.6 | consideraciones preliminares para realizar el balance de masas | 30 |
| 3.3 | Factores que interactúan en la tasa de recarga | 32 |
| 3.3.1 | Precipitación | 32 |
| 3.3.2 | Infiltración | 32 |
| 3.3.3. | La influencia de la vegetación en la infiltración | 34 |
| 3.3.1 | La importancia de los bosques en la recarga | 34 |
| 3.3.2 | Efectos del crecimiento urbano en el ciclo hidrológico | 35 |
| 3.1 | Degradación del suelo | 36 |
| 3.4.1 | Degradación física del suelo | 36 |
| 3.4.2 | Degradación química del suelo | 37 |
| 3.4.3. | La interacción de los ecosistemas agrícolas en la recarga | 37 |

Capítulo IV

Análisis y cuantificación espacio-temporal de la recarga

| | | |
|-------|--|----|
| 4.1 | Introducción | 38 |
| 4.2 | Modelos de Elevación Digital (MED) | 39 |
| 4.3 | Análisis de la información hidroclimatológica | 41 |
| 4.3.1 | Estaciones climatológicas..... | 41 |
| 4.3.2 | Proceso para completar la serie de datos faltantes de la precipitación y temperatura | 42 |
| 4.4 | Métodos para estimar la tasa de recarga en el acuífero del Valle de Toluca | 45 |
| 4.5 | Estimación de la recarga por el método tradicional | 45 |
| 4.5.1 | Evaluación de la precipitación promedio | 45 |
| 4.3.6 | Escurrimiento natural de la cuenca, estimado mediante la metodología que establece la Norma Oficial Mexicana | 46 |
| 4.5.1 | Evaluación empírica de la evapotranspiración real | 47 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.6 | Estimación de la recarga por el método hidrometeorológico | 51 |
| 4.6.1 | Estimación de la precipitación por el método spline..... | 51 |
| 4.6.2 | Escurrimiento natural estimado mediante distintas herramientas en un SIG | 52 |
| 4.6.3 | Evapotranspiración real evaluada mediante imágenes de satélite | 55 |
| 4.7 | Previsión del uso del suelo evaluado para el 2015, 2020 y 2025 | 58 |
| 4.8 | Percepción de la tasa de recarga para los años 2015, 2020 y 2025 | 59 |
| 4.9 | Abastecimiento de agua potable y crecimiento urbano | 59 |
| 4.9.1 | Crecimiento urbano y consumo de agua potable en 1985, 1996 y 2009 | 59 |
| 4.9.2 | Perspectivas del crecimiento urbano y del consumo de agua potable en el 2015, 2020 y 2025 | 60 |

Capítulo V

Evaluación de la recarga en el acuífero del valle de Toluca

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1 | Introducción | 61 |
| 5.2 | Análisis del Modelo digital de Elevación | 62 |
| 5.3 | Interpretación de la información hidrometeorológica | 62 |
| 5.2.1 | Estaciones climatológicas | 62 |
| 5.2.2 | Análisis de la serie de datos faltantes en la base de datos de precipitación y temperatura | 62 |
| 5.4 | Recarga estimada mediante el balance hídrico tradicional | 66 |
| 5.4.1 | Precipitación promedio estimada mediante métodos empíricos | 66 |
| 5.4.2 | Escurrimiento natural de la cuenca estimado mediante el método de la Norma Oficial Mexicana | 67 |
| 5.4.3 | Análisis de la estimación empírica de la evapotranspiración real | 67 |
| 5.4.4 | Evaluación de la recarga mediante el método tradicional | 68 |
| 5.5 | Estimación de la recarga a través de un balance hidrometeorológico..... | 76 |
| 5.5.1 | Precipitación estimada por el método spline | 76 |
| 5.5.2 | Escurrimiento natural de la cuenca evaluado a través del uso del suelo | 76 |
| 5.5.3 | Evapotranspiración real estimada mediante imágenes de satélite | 79 |
| 5.5.3 | Evaluación de la recarga estimada mediante un balance hidrometeorológico | 80 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| 5.6 | Previsión del uso del suelo para el 2015- 2020 y 2025 | 105 |
| 5.7 | Análisis de la proyección de la recarga para el 2015- 2020 y 2025 | 109 |
| 5.8 | Comparación y análisis de los resultados | 113 |
| 5.9 | Abastecimiento de agua potable y crecimiento urbano | 116 |
| 5.5.3 | Evaluación del crecimiento urbano y del consumo de agua potable en 1985-1996 y 2009 | 116 |
| 5.5.3 | Perspectivas del crecimiento urbano y del consumo de agua potable para el 2015-2020 y 2025 | 117 |
| | | |
| Capítulo VI | | |
| | Conclusiones y Recomendaciones | 120 |
| | Bibliografía | 126 |

Índice de figuras

- Figura 2.1** *Proyección de la ubicación geográfica de la cuenca del valle de Toluca. En la figura se puede apreciar los límites físicos y la división política de los municipios que integran total o parcialmente la cuenca* 16
- Figura 2.2** *Mapa geológico de la cuenca del Valle de Toluca. En la Figura se puede apreciar que en el centro del valle predominan las rocas clásticas volcánicas y en las zonas montañosas éstas son rocas volcánicas del periodo cuaternario.* 17
- Figura 2.3** *Mapa de los principales ríos tributarios de la Cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar el cauce de los ríos, así como los principales cuerpos de agua.* 69
- Figura 3.1** *Esquema general del ciclo hidrológico, donde destacan los distintos componentes que integran el balance hídrico en la superficie, en la zona no saturada y saturada* 33
- Figura 5.1** *Modelo Digita de Elevaciónl (MED) correspondiente a la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar que la cuenca se encuentra limitada al sur por el volcán Nevado de Toluca, al este por la Sierra de las Cruces y al noreste por el volcán Guadalupeana*..... 63
- Figura 5.2** *Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar los principales cuerpos de agua, conectados por el río Lerma, así como la traza urbana.* 64
- Figura 5.3** *Proceso para completar los valores faltantes de la serie de datos de la precipitación de una estación meteorológica. En a) se presentan los datos depurados de la precipitación, en b) los datos depurados y completados; con los que se obtuvieron los promedios de precipitación mensual y en c).se puede apreciar los valores promedios de la precipitación por mes* 65
- Figura 5.4** *Distribución promedio mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro y fuera de la cuenca del Valle de Toluca. La distribución se hace para cada año en estudio* 73
- Figura 5.5** *Distribución mensual de la precipitación promedio para 1985, 1996 y 2009.*..... 73
- Figura 5.6** *Mapa de Polígonos de Thiessen en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar el radio de influencia de cada polígono. Asimismo se pueden apreciar los principales cuerpos de agua y la traza urbana*..... 74
- Figura 5.7** *Mapa del uso del suelo en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar el área de influencia de cada uso del suelo que predimina en la zona de estudio.* 75

| | |
|---|----|
| Figura 5.8 Mapa de precipitación promedio anual en la cuenca del Valle de Toluca para el año de 1985, estimado por el método spline. En la figura se puede apreciar que la mayor tasa de precipitación ocurrió en la Sierra de las cruces y en el Nevado de Toluca | 83 |
| Figura 5.9 Mapa de precipitación promedio anual en la cuenca del Valle de Toluca para el año de 1996; estimada por el método Spline. En la figura, se puede apreciar que la mayor de precipitación ocurrió en los volcanes Nevado de Toluca y Guadalupeana. | 84 |
| Figura 5.10 Mapa de precipitación promedio anual en la cuenca del Valle de Toluca para el año del 2009, estimada por el método Spline. En la figura, se puede apreciar que la mayor precipitación ocurrió en el volcán Nevado de Toluca.... | 85 |
| Figura 5.11 Cambios en el uso del suelo en la cuenca del Valle de Toluca para los años 1985-1996..... | 86 |
| Figura 5.12 Cambios en el uso del suelo en la cuenca del Valle de Toluca para 1996-2009 | 86 |
| Figura 5.13 Mapa de permeabilidad del suelo para el 2009 en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar la mancha urbana y los principales cuerpos de agua. | 87 |
| Figura 5.14 Mapa uso del suelo para el año 1985 en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar la distribución del uso del suelo | 88 |
| Figura 5.15 Mapa uso del suelo para el año 1996 en la cuenca del Valle de Toluca, En la figura se puede apreciar la distribución del uso del suelo. | 89 |
| Figura 5.16 Mapa uso del suelo para el año 2009 en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar la distribución del uso del suelo | 90 |
| Figura 5.17 Mapa de escurrimiento natural de la cuenca para 1985. En la figura se puede observar que la mayor tasa de escurrimiento ocurre en la zona centro de la cuenca | 91 |
| Figura 5.18 Mapa de escurrimiento natural de la cuenca para 1996. En la figura se puede observar que la mayor tasa de escurrimiento ocurre en la zona centro de la cuenca | 92 |
| Figura 5.19 Mapa de escurrimiento natural de la cuenca para 2009. En la figura se puede observar que la mayor tasa de escurrimiento ocurre en la zona centro de la cuenca | 93 |
| Figura 5.20 Mapa del Índice de Cubierta Vegetal (NDVI). El la figura se puede apreciar que el mayor índice de cubierta vegetal está en las zonas montañosas que limitan la cuenca y el menor Índice se presenta en el valle | 94 |
| Figura 5.21 Mapa de radiación neta acumulada en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar que la mayor incidencia de la radiación ocurre en el valle y la menor radiación en las zonas altas que limitan la cuenca..... | 95 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.22 Mapa de temperatura promedio. En la figura se puede apreciar que la temperatura más alta ocurre en la zona centro de la cuenca y las temperatura más frías son en las partes montañosas que rodean la cuenca | 96 |
| Figura 5.23 Mapa de temperatura máxima de la cuenca del Valle de Toluca. En la Figura se puede apreciar, la distribución de la temperatura máxima. Ésta es mayor en la parte central de la cuenca..... | 97 |
| Figura 5.24 Temperatura mínima de la cuenca del Valle de Toluca. En él se puede apreciar que la temperatura más baja ocurre en las sierra de las Cruces y en los volcanes Nevado de Toluca y Guadalupeana | 98 |
| Figura 5.25 Mapa de la evapotranspiración real de la cuenca del Valle de Toluca para el año de 1985. En la figura se puede apreciar que las zonas altas que limitan la cuenca, es en donde se presentan los niveles más altos de evapotranspiración, mientras en la parte centro de la cuenca ésta es mínima .. | 99 |
| Figura 5.26 Mapa de la evapotranspiración real en la cuenca del Valle de Toluca, para el año 1996. En la figura se puede apreciar que las zonas altas que limitan la cuenca, es en donde se presentan los niveles más altos de la evapotranspiración, mientras en la parte centro de la cuenca ésta es mínima. | 100 |
| Figura 5.27 Mapa de evapotranspiración real de la cuenca del Valle de Toluca, para el año 2009. En la figura se puede apreciar que las zonas altas que limitan la cuenca, es en donde se presentan los niveles más altos de la evapotranspiración, mientras en parte centro de la cuenca la evaporación es baja..... | 101 |
| Figura 5.28 Mapa de recarga para el año de 1985. En la figura se puede apreciar que ésta ocurre en las zonas montañosas que limitan la cuenca..... | 102 |
| Figura 5.29 Mapa de recarga para el año de 1996. En la figura se puede apreciar que ésta ocurre en las zonas montañosas que limitan la cuenca..... | 103 |
| Figura 5.30 Mapa de recarga para el año de 2009. En la figura se puede apreciar que ésta ha disminuido en la Sierra de las cruces | 104 |
| Figura 5.31 Mapa de proyección de uso suelo para el año 2015 con límites municipales. En la figura se puede apreciar la distribución de los usos del suelo | 106 |
| Figura 5.32 Mapa de proyección del uso suelo para el año 2020 con límites municipales. En la figura se puede apreciar la distribución de los usos del suelo | 107 |
| Figura 5.33 Mapa de proyección del uso suelo para el año 2025 con límites municipales | 108 |
| Figura 5.34 Mapa de proyección de la recarga para el año 2015. En la figura se puede apreciar la posible distribución de la recarga puede ocurrir en las zonas montañosas que limitan la cuenca | 110 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.35 Mapa de proyección de la recarga para el año 2020. En la figura se puede apreciar la posible distribución de la recarga puede ocurrir en las zonas montañosas que limitan la cuenca..... | 111 |
| Figura 5.36 Mapa de proyección de la recarga para el año 2025. En la figura se puede apreciar la posible distribución de la recarga puede ocurrir en las zonas montañosas que limitan la cuenca | 112 |
| Figura 5.37 Gráfica de comparación de resultados de la recarga para los años de estudio. En la figura se puede apreciar que los resultados obtenidos algunos son similares y otros difieren..... | 115 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1 <i>Técnicas para estimar la recarga en distintas regiones con climas húmedos, áridos y semiáridos.....</i> | 31 |
| Tabla 4.1 <i>Tabla para calcular el índice de aridez estimada mediante la clasificación climática de Köppen</i> | 50 |
| Tabla 4.2 <i>Valores de coeficiente de escurrimiento según Benítez et al., (1980).</i> | 54 |
| Tabla 5.1 <i>Precipitación promedio anual (mm) en la cuenca del valle de Toluca, estimada por métodos empíricos para 1985, 1996 y 2009</i> | 53 |
| Tabla 5.2 <i>Cálculo de K para determinar el escurrimiento natural en el acuífero del Valle de Toluca mediante un promedio ponderado en función del tipo de suelo</i> | 70 |
| Tabla 5.3 <i>Valores de Escurrimiento natural de la cuenca estimado mediante la metodología que establece la Norma Oficial Mexicana.</i> | 70 |
| Tabla 5.4 <i>Parámetros utilizados para realizar el ajuste a la fórmula de Turc de acuerdo a la metodología que establece Maderey et al., (1995).....</i> | 71 |
| Tabla 5.5 <i>Valores de evapotranspiración real para 1985, 1996 y 2009 obtenidos del procesamiento de la metodología de Maderey et al., (1995)</i> | 71 |
| Tabla 5.6 <i>Valores de recarga para la cuenca del Valle de Toluca para los años 1985, 1996 y 2009 estimada con la evapotranspiración real con y sin el ajuste a la éste parámetro.....</i> | 72 |
| Tabla 5.7 <i>Permeabilidad del suelo en la cuenca del Valle de Toluca en 1985, 1996 y 2009</i> | 81 |
| Tabla 5.8 <i>Escurrimiento natural de la cuenca, estimado mediante herramientas en un Sistema de Información Geográfica</i> | 82 |
| Tabla 5.9 <i>Valores de evapotranspiración real para 1985, 1996 y 2009 estimados con y sin el ajuste a la fórmula de Turc</i> | 82 |
| Tabla 5.10 <i>Crecimiento urbano y consumo de agua potable en la cuenca del Valle de Toluca (1985-1995-2010)</i> | 118 |
| Tabla 5.11 <i>Crecimiento urbano y consumo de agua potable en la cuenca del Valle de Toluca (2015-2020 y 2025).....</i> | 119 |

Capítulo I

Análisis de los recursos hídricos y su relación con el régimen de recarga

1.1 Introducción

A lo largo de la historia, el agua dulce ha sido un recurso de suma importancia, debido a que la vida en el planeta depende en su gran mayoría de esta vital sustancia. A medida que aumenta el consumo de agua potable, la disponibilidad del agua subterránea disminuye considerablemente, situación que pone de manifiesto la escasez y la disminución del agua potable. Específicamente, la creciente extracción del agua subterránea empezó en la primera mitad del siglo XX; esto fue por el incremento de la demanda de agua potable que a su vez es el resultado del incremento de la población, lo cual ha dado lugar a nuevas técnicas de bombeo y la incremento de estudios hidrogeológicos.

La extracción excesiva del agua subterránea ha ocasionado el descenso en los niveles piezométricos, el hundimiento y agrietamiento del suelo. Ante ello, la cuantificación de la recarga natural es un requisito básico para la gestión y distribución eficaz del líquido. Es particularmente importante hacer la estimación en regiones donde el agua subterránea es la fuente principal de abastecimiento (Kumar., 1993). Actualmente muchos métodos han sido desarrollados para estimar la recarga (Lerner *et al.*, 1990; Scalón *et al.*, 2002). Sin embargo, elegir la técnica adecuada, es a menudo difícil debido a la cantidad de variables que en la recarga intervienen.

En México, la técnica más empleada para estimar la recarga es el balance hídrico, tal y como se describe en la Norma Oficial Mexicana (Nom-011-CONAGUA-2000) (CONAGUA, 2002). De los resultados obtenidos en el balance hecho, se establecen las políticas de gestión de los recursos hídricos en las distintas regiones. Una de las limitantes que se tiene al estimar la recarga bajo este método, es trabajar con coeficientes empíricos para hacer la estimación del escurrimiento natural de la cuenca. Aunado a lo anterior, uno de los parámetros más difíciles de cuantificar en el balance de masas es la evapotranspiración real. Por tal motivo, se requiere el uso de nuevas metodologías que permitan hacer la estimación de la evapotranspiración real y del escurrimiento natural de la cuenca, además de otras variables que intervienen en la estimación de la infiltración en el sistema acuífero.

1.2 Antecedentes del uso del agua potable

1.2.1 El agua subterránea en México

De acuerdo con Arreguin, (2007), el agua subterránea es la materia prima más importante para el desarrollo económico del país. En más del 50% del territorio mexicano prevalecen los climas secos y semi-secos; zonas, en las que el agua subterránea es la fuente más próxima para abastecer las necesidades hídricas humanas e industriales.

México enfrenta severos problemas de escasez y disponibilidad de agua potable. La nación presenta una escasez sustancial de agua potable en comparación con otros países de Latinoamérica. De manera sorprendente, México es un país con altos incidentes de explotación y despilfarro del agua potable; también es uno de las naciones con mayor tasa de crecimiento demográfico.

Según Ávila (1996) la población Mexicana se ubica dentro de los países que más agua subterránea consume. México es un país que extrae de manera intensiva e irracional los recursos naturales, en especial, los recursos hídricos y bosques. Aunado a lo anterior, la extracción de agua que se hace hoy en día de los acuíferos es para abastecer principalmente las necesidades hídricas de la agricultura, la ganadería, el uso doméstico y la industria. Estas actividades consumen alrededor de 30.1 mil millones de metros cúbicos de agua al año, (CONAGUA- SEMARNAT, 2011). La dependencia humana del agua subterránea, el crecimiento demográfico y los cambios sustanciales en el uso del suelo, alteran las condiciones naturales del ciclo hidrológico (Carrillo, 2006).

Históricamente en la década de los 40's, los consumos excesivos del agua subterránea en el país ya era una realidad. Posteriormente en la década de los ochentas México duplicó su población; con tales incrementos, se intensificó la tasa de extracción y se incrementó el número de acuíferos sobreexplotados; en 1980 había 36 acuíferos sobreexplotados, mientras que para el año 2001 la cifra incrementó considerablemente a 97 y para el 2009 ya eran 100 los acuíferos sobreexplotados. De los acuíferos sobreexplotados se extrae el 56.3% del agua subterránea para los distintos usos de agua en el país (CONAGUA-SEMARNAT, 2011).

1.2.2 Uso consecutivos del agua subterránea en la cuenca del Valle de Toluca

En 1951 entró en operación el Sistema Lerma, el cual inicialmente consistía en captar el agua superficial de Almoloya del Río, Texcaltenango y la cuenca del Valle de Toluca, además de la extracción del agua de cinco pozos profundos. Sin embargo, en 1975 entra en operación una segunda etapa del sistema, debido a una crisis de agua en la ciudad de México, por lo que la extracción de la cuenca se hizo más intensa, lo cual dio lugar a que se perforaran 230 pozos (Duran *et al.*, 1999).

De acuerdo con Aboites, (1998), la cuenca del Valle de Toluca pertenece a la cuenca del Lerma_Chapala. En antaño, la región se caracterizó por haber alojado un vasto sistema lacustre que permitió durante muchos siglos la vida de los habitantes y consecuentemente el crecimiento urbano de los pueblos, quienes han aprovechado de distintas formas el entorno natural.

El crecimiento de la mancha urbana de la zona metropolitana del Distrito Federal así como el centralismo político, han sido uno de los factores que han condicionado el incremento en la cantidad de agua que se envía de la cuenca del Valle hacia la Ciudad de México y Toluca; otro factor de gran relevancia es el desarrollo industrial del corredor Lerma-Toluca. La demanda del agua potable en este corredor ha ocasionado alteraciones a la calidad y cantidad del agua subterránea. Otro acontecimiento muy marcado, es la fragmentación y desaparición de algunos cuerpos de agua; este fenómeno se debe principalmente al crecimiento de la mancha urbana en el centro del Valle y en las zonas metropolitanas aledañas a la ciudad (Peña, 2000).

Según Duran *et al.*, (1999) el crecimiento urbano de la ciudad de México y la ciudad de Toluca así como la concentración del corredor industrial, han sido puntos claves en la devastación de espacios verdes y en la alteración al sistema natural. De tales alteraciones se ha incrementado la extracción de agua en el acuífero.

Debido a la excesiva extracción, en 1996, se declaró un estado de veda de perforación de pozos en la región “Toluca-Ixtlahuaca” por tiempo indefinido, pero a pesar de este estado, en 1997 se inicio la perforación de 200 nuevos pozos como parte del sistema Lerma; esto fue con la finalidad de abastecer las necesidades hídricas de la Ciudad de México (Boehm *et al.*, 1999) Actualmente, el acuífero presenta un déficit hídrico de $-152.52 \text{ Hm}^3/\text{año}$, (CONAGUA, 2009)

1.2.3 Extracción hídrica en la cuenca del Valle de Toluca

Específicamente el sistema Lerma empezó a operar en 1951-1965. Inicialmente se extrajeron 4 m^3/s para saciar las necesidades hídricas de la ciudad de México, desde ese momento empezaron a desaparecer algunos manantiales y a disminuir la superficie de las lagunas, algunos terrenos de cultivo se compactaron y se convirtieron en sumideros (Boehm *et al.*, 1999)

De acuerdo con Olaiz *et al.*, (2003), la construcción y operación de los pozos en la cuenca ha tenido consecuencias adversas al entorno natural; específicamente a partir de 1975 se extrajo un monto superior a la capacidad de recarga; a partir de este año empezó la sobreexplotación del agua de la cuenca del Valle de Toluca, ésta llegó a su máximo en 1999 cuando se extrajeron alrededor de 656 millones de metros cúbicos anuales, superando así la capacidad de recarga de la cuenca (Contreras, 1991) La respuesta de tales efectos, ya se han hecho presentes en la desecación de algunos manantiales, la generación de grietas, el colapso del terreno y la disminución de los caudales, entre otros (Esteller y Díaz-Delgado, 2002 y Esteller y Andreu, 2005)

1.2.4 Técnicas más utilizadas para estimar la tasa recarga

En términos generales se denomina recarga al proceso por el que se incorpora agua un a un acuífero procedente del exterior del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (la más importante en general) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde otro acuífero o acuitardo, siempre que estos sean externos al acuífero (Alcalá, 2005)

Las aguas subterráneas constituyen una de las principales fuentes hídricas para el consumo humano. Estas no requieren ningún tratamiento antes de ser utilizadas. En México como en Latinoamérica, estas aguas son una fuente principal de abastecimiento. En la República los sistemas hídricos son muy variados: algunos son altamente permeables, mientras que otros poseen permeabilidad muy baja, casi nula. Los hay porosos o fracturados; existen algunos que almacenas miles de metros cúbicos y otros contienen millones.

Por lo anterior es importante cuantificar la tasa de recarga, en un acuífero sometido a sobreexplotación y con baja permeabilidad como lo es el acuífero del Valle de Toluca. La recarga puede ser entendida como el agua que llega al nivel freático, ésta puede ser de forma natural o inducida. La importancia de evaluar la cantidad de agua que llega a un sistema radica en cuantificar el agua que se puede infiltrar en él.

Para cuantificar la recarga existen variados métodos: modelos matemáticos, métodos de trazadores, de medición directa, hidrodinámicos, hidrogeológicos, en Sistemas de Información Geográfica y el tradicional balance de masas. Éste último, es uno de los métodos más utilizados para evaluar la tasa de recarga: para ello, se utilizan diversas herramientas de los componentes que en él interactúan.

En la práctica, sólo algunos componentes pueden ser medidos directamente, tal es el caso de la precipitación; ésta puede ser medida a través de infiltómetros y pluviógrafos, mientras que el resto de los componentes debe ser estimados indirectamente, tal es el caso de la evapotranspiración real, el escurrimiento natural de la cuenca, entre otros. Un método muy común que se emplea para estimar el balance hídrico.

1.3 Objetivos y Alcances

1.3.1 Objetivo general

Estimar la recarga regional del acuífero del valle de Toluca bajo cambios temporales por deforestación e incremento de la superficie urbana, considerando los parámetros hidrogeológicos y meteorológicos, para analizar la influencia de los cambios temporales en la tasa de recarga.

1.3.2 Objetivos específicos

- i)* Analizar parámetros hidrogeológicos y meteorológicos a partir de la información de estudios previos en la cuenca del Valle de Toluca, con el fin de integrar información de referencia.
- ii)* Estructurar y validar los parámetros hidrometeorológicos y posteriormente procesarlos en un Sistema de Información Geográfico.
- iii)* Evaluar los cambios temporales del crecimiento urbano y la deforestación a través de imágenes de satélite, para valorar su influencia en las tasas de recarga.
- iv)* Realizar un balance hídrico tradicional en base a datos históricos climatológicos y de acuerdo a la metodología que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CONAGUA-200).
- v)* Realizar un balance hidrometeorológico a través de parámetros meteorológicos distribuidos espacial y temporalmente.
- vi)* Analizar los resultados obtenidos del balance hídrico tradicional y del balance hidrometeorológico y consecutivamente realizar una serie de conclusiones y recomendaciones.

1.4 Contenido de la tesis

La presente investigación se estructura en seis capítulos; en el capítulo I se abordan algunas consideraciones sobre la cuenca del Valle de Toluca así como la importancia del agua y su uso en México y en la cuenca de estudio.

En el capítulo II se hace una descripción de las características de la cuenca de estudio. En esta descripción se expone la localización geográfica, la fisiografía del acuífero, la geología, la hidrografía y también se hace una descripción de estudios técnicos realizados en el acuífero.

En el capítulo III se refiere a los métodos que existen para cuantificar la recarga así mismo se hace una descripción de algunos factores que interactúan en la recarga (precipitación, infiltración, los bosque, el crecimiento urbano y los diferentes cambios en el uso del suelo)

En el capítulo IV contiene los métodos y materiales aplicados en la presente investigación; este capítulo se dividió en dos apartados, el primero se refiere a la estimación de la recarga en base a datos históricos climatológicos. El segundo apartado consiste en estimar la recarga mediante un balance hidrometeorológico, estimado mediante parámetros climatológicos. En especial se evaluaron los cambios de uso del suelo, posteriormente se evaluó el escurrimiento en función de éstos usos y finalmente se estimó la evapotranspiración real. En este apartado también se crearon proyecciones de los cambios en los usos del suelo para los años 2015-2020-2025

El capítulo V contiene los resultados de cada metodología empleada. En este apartado también se tienen proyecciones de la posible tasa de recarga para los años 2015-2020-2025

En el capítulo VI hace referencia a las conclusiones y recomendaciones derivadas de la presente investigación.

Capítulo II

Condiciones hidrogeológicas del acuífero volcánico del valle de Toluca

2.1 Introducción

En el presente capítulo se describen las generalidades de la zona de estudio, las cuales comprende la descripción general de la cuenca de estudio, asimismo se describen las condiciones hidrogeológicas, así como las condiciones hidroclimatológicas que predominan en la cuenca y finalmente se hace una descripción breve de algunos estudios técnicos realizados previamente en la cuenca.

2.2 Generalidades de la cuenca del Valle de Toluca

La cuenca del Valle de Toluca pertenece a la cuenca Lerma- Chapala. De acuerdo con Olaiz *et al.*, (2003) la cuenca Lerma se ubica en el centro del Occidente de la República Mexicana, abarca una superficie de 54, 300 km². Ésta cruza cinco estados de la República: Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Jalisco y el Estado de México. La región hidrológica representa el 3% del territorio nacional. Esta región es la fuente de suministro de agua potable de cerca de 20 millones de personas establecidas dentro de la zona. El proceso de urbanización es un factor que día a día crece sin control alguno. Desde antaño, el suministro y la disponibilidad del agua potable han sido uno de los factores principales para el desarrollo socioeconómico e industrial de la cuenca.

Hoy en día, es evidente el crecimiento demográfico e industrial dentro de la zona hídrica; En distintas zonas urbanas e industriales de la cuenca Lerma-Chapala, las necesidades de agua superan la disponibilidad del recurso. Actualmente se extrae más agua de la que el propio sistema puede recargar. La escasez del agua potable y el estrés hídrico es una realidad para las ciudades que dependen directamente del suministro de esta cuenca. Otro factor que incrementa la escasez de la vital sustancia, es un factor llamado contaminación; este fenómeno puede ser de forma puntual o difusa, ésta altera la calidad y cantidad del agua disponible. Otra razón que ha contribuido a la escasez, es el consumo desmedido y desproporcionado por parte de los habitantes que radican en la zona.

De acuerdo con Caire, (2003) la ausencia de la vital sustancia, ha sido motivo de conflictos por agua entre municipios y estados que dependen directamente del agua de la cuenca Lerma- Chapala; tan solo en la última década, los conflictos por la sustancia han incrementado, lo cual es explicable por la extracción excesiva de agua para saciar las necesidades hídricas de la zona industrial, agrícola y urbana.

El acuífero del Valle de Toluca se ubica dentro del Estado de México. En el Estado se genera poco más de la tercera parte de la producción industrial a nivel nacional, esto se debe a que en el estado se encuentra establecido el corredor Lerma-Chapala, el cual, es uno de los corredores industriales más importante del país (Vargas *et al.*, 2005).

Sin embargo, con el establecimiento del corredor el incremento demográfico se ha intensificado aún más. Mientras la mancha urbana incrementa, la disponibilidad per-cápita anual de agua disminuye (CNA, 1997).

Según Olaiz *et al.*, (2003) la cuenca del Valle de Toluca, presenta severos problemas de estrés hídrico. De acuerdo a Olaiz la cuenca se encuentra en el límite de aprovechamiento y extraer más agua superficial o subterránea en cualquier punto de la zona, implica afectar el aprovechamiento establecido de aguas abajo.

2.3 Características hidrogeológicas de la zona de estudio

2.3.1 Localización geográfica

La zona de estudio pertenece a la cuenca Lerma-Chapala, específicamente se localiza en la cuenca del Valle de Toluca, en la porción central del Estado de México, entre los paralelos 19°03' y 19°31' de latitud norte y los meridianos 99°18' y 99°52' de longitud oeste (CONAGUA, 2009)

La topografía de esta región convierte a la cuenca en una de las principales cuencas del país, debido a que es un valle rodeado de formaciones montañosas de origen volcánico, tanto de este a sur como de este a norte, teniendo en la dirección noreste una formación favorable de salida natural del escurrimiento superficial hacia el acuífero de Ixtlahuaca.

La cuenca del Valle de Toluca pertenece a la región hidrológica N°12; ésta limita al Norte con el valle de Ixtlahuaca y el cerro de Jocotitlán; al oriente con la Sierra de las Cruces y el Monte Alto; al sur por el cerro de Tenango; y al poniente con el Volcán Nevado de Toluca, cubriendo un área aproximada de 2116.76 km² (Franco, 2002).

En la figura 2.1 se pueden apreciar los municipios que se encuentran asentados en la cuenca de estudio. Cabe hacer mención, los municipios de: Toluca, Metepec, Chapultepec, Calimaya, San Mateo Atenco, San Antonio la Isla, Texcalyacac, Rayón, Almoloya del Río, Tianguistenco, Lerma, Jalatlaco, Ocoyoacac, Xonacatlán, Oztolotepec, Atizapán, Zinacantepec, Temoaya y Capulhuac se encuentran totalmente dentro de la cuenca y los municipios de: Almoloya de Juárez, Jilotzingo, Joquicingo, Mexicalcingo, y Tenango del Valle se encuentran parcialmente en la cuenca. Básicamente los municipios que se encuentran totalmente en la cuenca pertenecen a la zona metropolitana de la ciudad de Toluca y son los municipios de mayor importancia debido a su ubicación y extensión territorial.

2.3.2 Fisiografía del acuífero

La cuenca presenta una forma alargada irregular con orientación noroeste-sureste con una longitud de 133 kilómetros. Está ubicada en la provincia fisiográfica denominada Meseta Neovolcánica. Presenta una variedad de formas, características de su origen y de los procesos que trazaron su morfología actual (GTZ, 2008).

Los límites físicos de la cuenca son: al suroeste, con el Nevado de Toluca, con 4680 msnm, principal altura de la cuenca, al este, con el Valle de México, al sur-este con la Sierra de las Cruces y al norte con el Valle Atlacomulco- Ixtlahuaca.

El Valle de Toluca se localiza dentro de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, la cual se caracteriza por una serie de manifestaciones volcánicas, las más importantes del país, que dieron origen a los volcanes: Popocatepetl, Iztaccihuatl y el Nevado de Toluca, en cuyos pies tiene asiento la ciudad de Toluca, capital del estado de México (CONAGUA, 2009)

2.3.3 Geología en la cuenca

El Valle de Toluca presenta una gran cantidad de unidades litológicas de origen volcánico reciente, donde las rocas aflorantes presentan edades que van del Terciario Medio (26 millones de años) al reciente que se manifiesta por la presencia de complejos volcánicos. Las partes altas están constituidas por basaltos, andesitas y materiales piroclásticos que se encuentran bordeando las sierras. Estos materiales incluyen tobas, aglomerados, brechas, cenizas volcánicas, derrames lávicos, y materiales producto de la desintegración y erosión constituidos principalmente por arenas, gravas, arcillas limos y depósitos lacustres (CONAGUA, 2002)

El área de estudio es una planicie constituida por materiales lacustres, producto de los diferentes cuerpos de agua de la cuenca, así como por depósitos aluviales (figura 2.2). El Terciario contribuyó con una gran cantidad de rocas volcánicas de composición ácida a intermedia, como las Andesitas Xochitepec y la formación las Cruces. En el valle, se identifican sedimentos lacustres y aluviales que se encuentran intercalados con materiales clásticos de origen volcánico. A estos depósitos se les asigna una edad correspondiente al Plioceno Tardío – Cuaternario (CONAGUA, 2002)

2.3.4 Características hidrogeológicas

La zona de estudio se localiza en la provincia geohidrológica Faja Volcánica Transmexicana. Como características generales de esta provincia se puede señalar la presencia de basaltos con alta permeabilidad debida, principalmente, al grado de fracturación, así como a la presencia de tubificaciones en los derrames y a la intercalación del material escoráceo. Estos acuíferos volcánicos fracturados están cubiertos, en los valles, por depósitos lacustres y aluviales, cuya permeabilidad es muy variable, por lo que se convierten en acuíferos confinados o semiconfinados que se caracterizan por tener un coeficiente de almacenamiento bajo. Los niveles del material piroclástico tienen una alta porosidad, pero su permeabilidad es baja funcionando como acuitardos (Anton y Díaz-Delgado 2002)

Los depósitos lacustres del Plioceno Tardío se caracterizan por su poca permeabilidad por lo que también constituyen acuitardos. Los materiales aluviales no consolidados (gravas, arenas, arcillas y limos) forman acuíferos someros cuya transmisividad varían con base al tamaño del grano y con base al espesor del estrato. Como basamento de los valles intercalados en el paquete sedimentario suelen aparecer rocas andesitas que actúan como materiales impermeables de base. En el caso de los valles tectónicos, este basamento se puede encontrar a ciertos metros de profundidad (Velázquez y Ordaz, 1994) en Anton y Díaz-Delgado (2002)

En el caso concreto del Valle de Toluca, el acuífero está formado por materiales detríticos con predominio de gravas, arenas y conglomerados con matriz arcillo-limosa, aunque también se pueden diferenciar intercalaciones de los niveles de piroclasto y tobas. El sistema está formado por varios niveles acuíferos superpuestos que constituyen un acuífero multicapa, pero la existencia de cierta continuidad hidráulica permite considerar un sistema de flujo único. No obstante, existen diferencias significativas de carga hidráulica. Estos materiales detríticos reposan sobre un basamento constituido por material volcánico consolidado. En algunos sondeos realizados por la Gerencia Regional del Valle de Toluca se ha establecido la presencia de basaltos y andesitas a profundidades superiores a los 100 metros (Unitecnia, 1996) en Anton y Díaz-Delgado (2002)

De acuerdo con Anton y Díaz-Delgado (2002) los límites de este acuífero son: Al norte el Volcán la Guadalupeana, el cerro el Águila y la Sierra Monte alto y el Valle de Ixtlahuaca-Atacomulco que define un límite abierto porque existe una conexión hidráulica entre los dos valles. Al sur los volcanes Tenango y Zempoala, también constituyen un límite abierto entre los materiales detríticos y los volcánicos fracturados que afloran en la zona. Al este la Sierra de las Cruces y la Iglesia formando un límite permeable, porque se establece una conexión entre los depósitos detríticos y los afloramientos de materiales volcánicos fracturados y al oeste el volcán Nevado de Toluca (Xinantecatl) y la Sierra Morelos, que definen un límite abierto por lo que existe una comunicación hidráulica entre los acuíferos fracturados y el material detrítico que constituyen el valle.

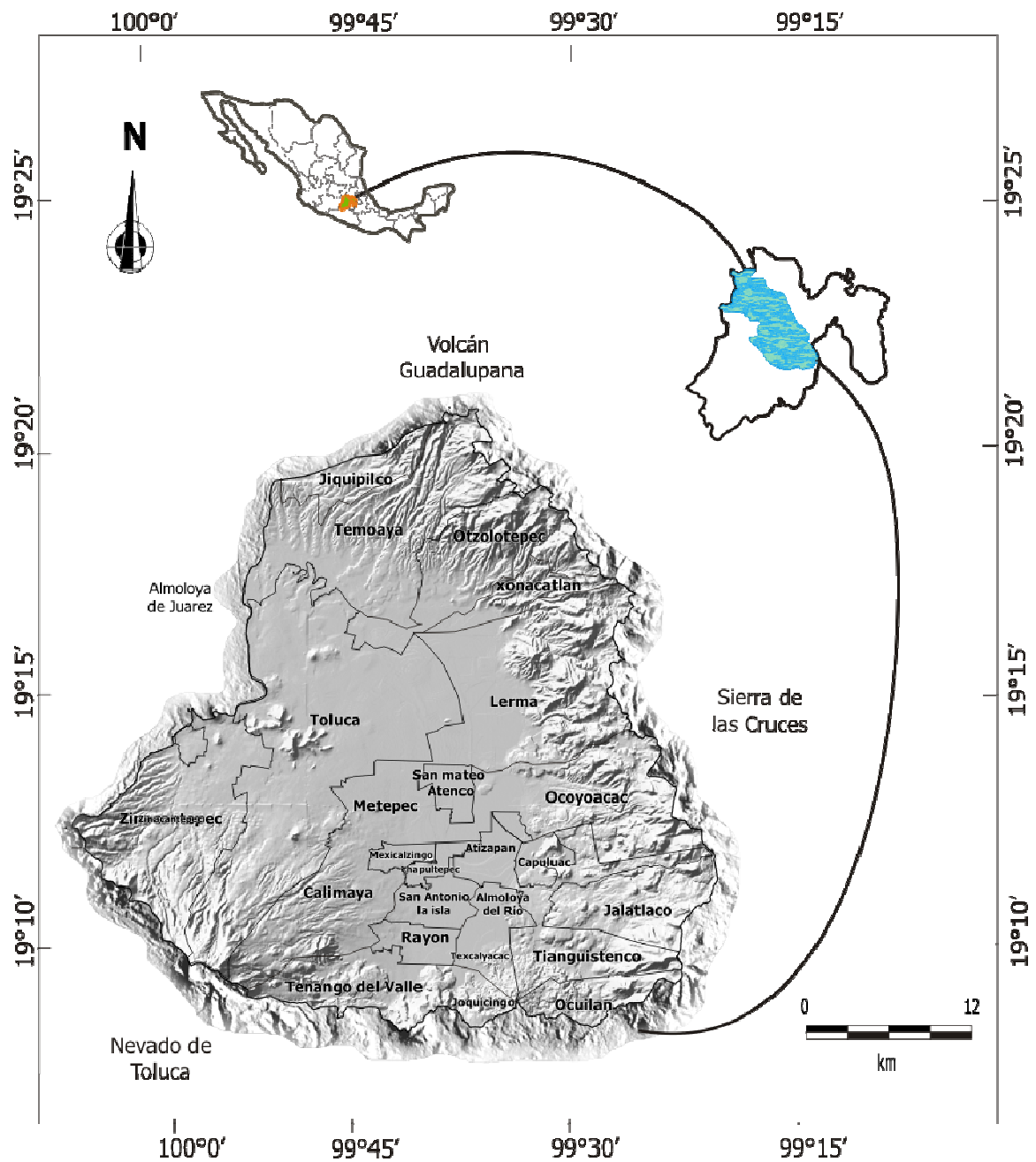


Figura 2.1 Proyección de la ubicación geográfica de la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar los límites físicos y la división política de los municipios que integran total o parcialmente la cuenca. Fuente elaboración propia.

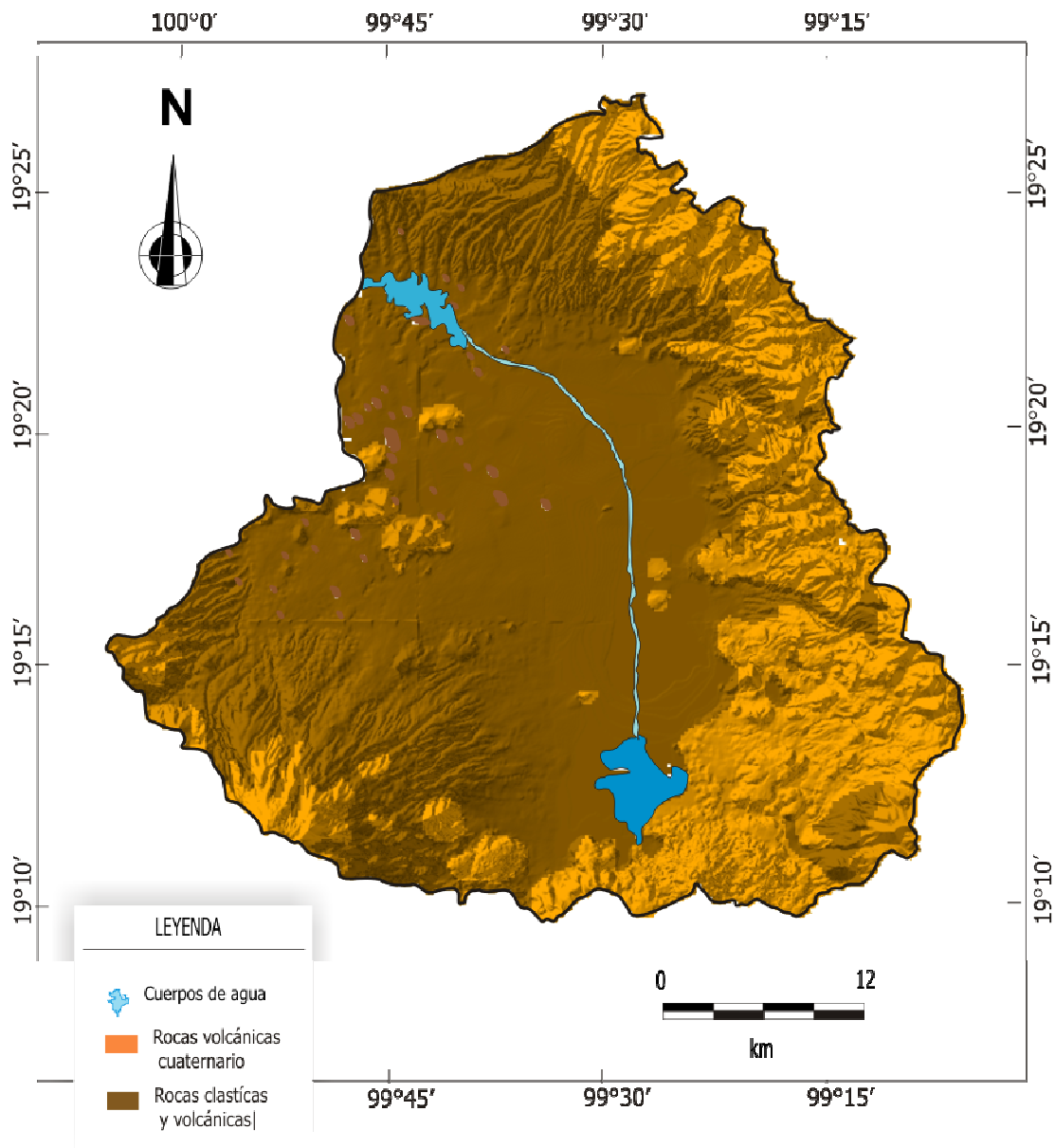


Figura 2.2 Mapa geológico de la cuenca del Valle de Toluca. En la Figura se puede apreciar que en el centro del valle predominan las rocas clásticas volcánicas y en las zonas montañosas éstas son rocas volcánicas del periodo cuaternario. Fuente elaboración propia con datos de la CONABIO (1999).

2.4 Hidrología en la zona de estudio

2.4.1 Hidrografía del acuífero

Uno de los principales ríos que alimentan a la cuenca y a las lagunas, proviene del volcán Nevado de Toluca. De este volcán descienden los ríos: Sanabrias, Tejalpa, Cano y agua Vendita, éstos van con dirección al oriente y desembocan en el río Lerma. El río Sanabria tiene dirección hacia San Antonio la Isla y desemboca en la laguna de Almoloya, lugar de nacimiento del Río Lerma.

De la Sierra de las Cruces y de los volcanes Guadalupeana y Monte Alto descienden los ríos: Temoaya, Santa Catarina, San Mateo y Xalatlaco, éstos también desembocan en el Río Lerma y éste converge en la presa Antonio Alzate (Figura 2.3). Por otro lado, en los ríos Cano y Verdiguél, se descargan las aguas residuales provenientes de la ciudad de Toluca y poblaciones aledañas (Brigitte, 2002).

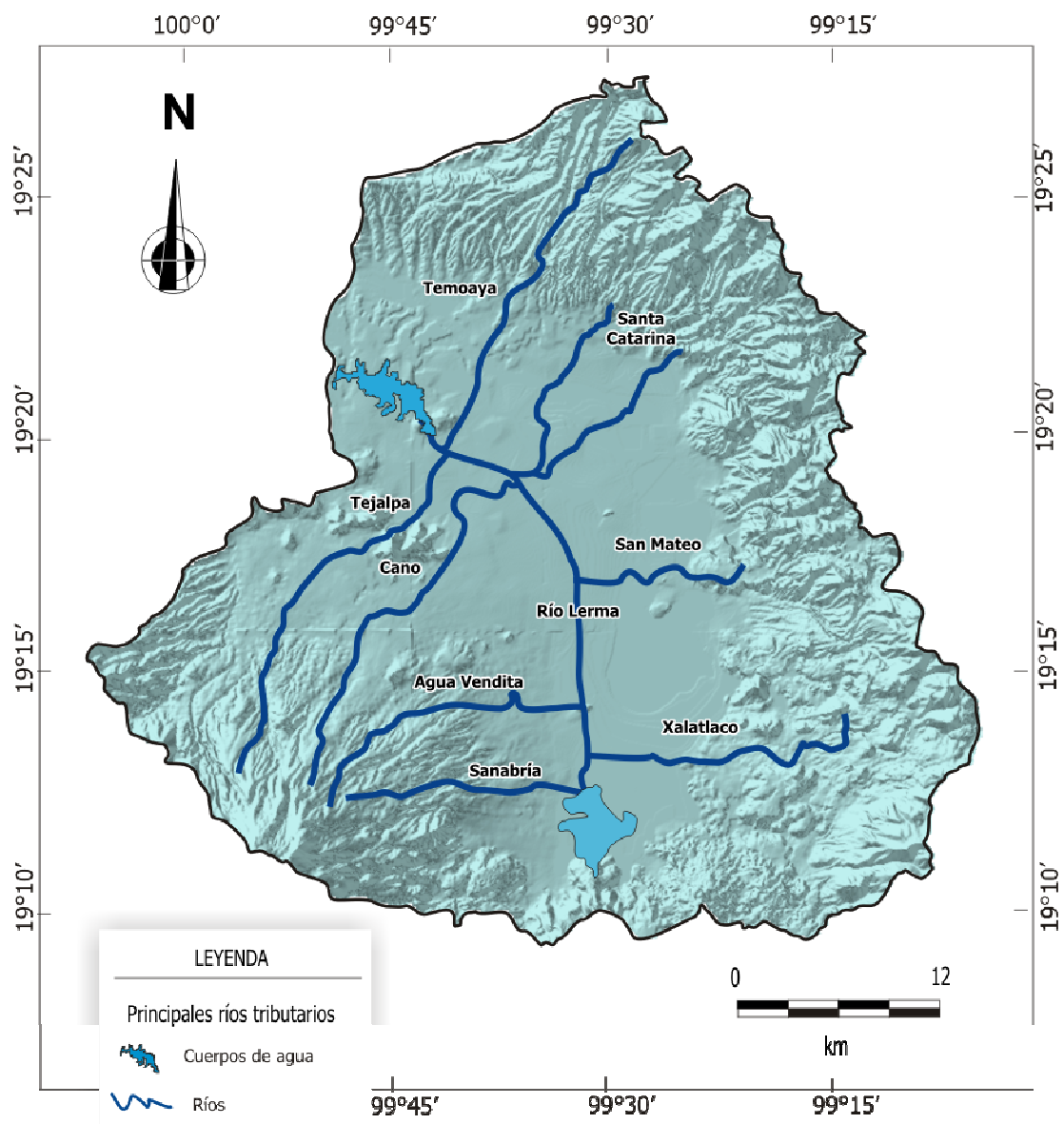


Figura 2.3 Mapa de los principales ríos tributarios de la Cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar el cauce de los ríos, así como los principales cuerpos de agua. Fuente elaboración propia.

2.4.2 Hidrometeorología en la cuenca

En relación con el clima imperante y con base a la clasificación de Köppen y García, (1981) el clima del Valle de Toluca se clasifica como templado, subhúmedo, con lluvias en verano y con un porcentaje de precipitación invernal menor a 5 *mm*. Hacia las estribaciones del Nevado, el clima se torna semifrío a subhúmedo con lluvias en verano, con un porcentaje de precipitación invernal que oscila entre 5 y 10.2 *mm* (Franco-Plata, 2002)

Respecto a la precipitación pluvial, la media anual oscila entre 800 y 1,000 *mm* para el Valle de Toluca y hacia las faldas del Nevado la precipitación se incrementa aproximadamente a 1,200 *mm* anuales. La temporada de lluvias se presenta de mayo a octubre, siendo estas más intensas en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. La época de estiaje tiene lugar entre los meses de noviembre y abril, aunque suelen haber algunas precipitaciones de baja intensidad (Franco, 2002)

2.5 Estudios previos de estimación de recarga en el acuífero

Históricamente la extracción de agua en el acuífero inició en la década de los 40's, cuando se comenzó a extraer agua para abastecer la demanda hídrica de los habitantes del Distrito Federal y zonas conurbadas; en los últimos años ha sido notoria la extracción excesiva de agua dentro del acuífero del Valle de Toluca. Esta extracción en parte se debe a que se designa agua a una de las principales zona económico e industrial más importante del país. El crecimiento de la ciudad de México y Toluca y las condiciones hídricas del acuífero han sido motivo de interés en el acuífero. A continuación se describen algunos estudios en torno al tema.

El primer estudio fue realizado por la empresa Servicios Geológicos, S.A. en 1966. El objetivo de la investigación era captar el agua de los manantiales que alimentaban las lagunas de Almoloya del Río y por tanto al río Lerma; para ello construyeron infraestructura que permitió captar y dirigir el agua hacia la ciudad de México y Toluca y concluyeron que la demanda hídrica de ambas ciudades sería saciada.

El siguiente estudio se realizó en 1970 por la empresa Oficina de Estudios Especiales de la Secretaría de Recursos Hídricos del Distrito Federal (SRH). El objetivo fue incrementar la distribución y abastecimiento de agua para la ciudad de México. Para realizarlo instalaron piezómetros a distintas profundidades y posteriormente hicieron uso de las observaciones hechas en la red de estaciones piezométricas. En este estudio se concluye que en el periodo de 1966-1970, el abatimiento piezométrico fue del orden de 3 a 4 *m* en la zona urbana de Toluca, también se estableció que la alimentación a los acuíferos de Toluca e Ixtlahuaca, oscilaba en el orden de 11 m³/s en promedio y finalizan señalando los efectos del sobre Bombeo en la cuenca.

En 1977 la empresa de Ingenieros Civiles y Geólogos Asociados realizaron una actualización del levantamiento de las grietas. El objetivo de este trabajo consistió en censar las grietas de los valles de Toluca e Ixtlahuaca. Llegando a la conclusión que la presencia de las grietas habían sido de reciente formación y fue a causa de la sobreexplotación de los acuíferos y de la construcción de obras para conducir el agua del sistema Cutzamala a la ciudad de México y Toluca.

Posteriormente, En 1987 la empresa de Lesser y Asociados efectuaron otro trabajo con el propósito de medir los niveles estáticos en los pozos piloto de los Valles de Toluca e Ixtlahuaca. Dichas mediciones se realizaron para determinar la evolución de la superficie piezométrica del acuífero. De esa manera, obtuvieron datos para sustentar numerosos dictámenes que se requirieron para realizar nuevas perforaciones.

Ellos reportaron datos interesantes relacionados con la evolución piezométrica. Para el periodo de 1970-1987, el resultado que manifiestan es un abatimiento de 70 *m* en la zona industrial aledaña a la ciudad de Toluca y disminuyen radialmente hasta mostrar abatimientos entre 10 y 20 *m* en el resto del Valle; en la porción sur, los mayores abatimientos son del orden de 30 *m* y se presentan hacia Almoloya del Río a la altura de la población de Lerma. En el área de Santa María Atarasquillo los abatimientos variaron entre 30 *m* y 60 *m* y en la parte del norte del Valle de Toluca el abatimiento osciló en el orden de 10 *m*.

En 1992 la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Distrito Federal a través del Grupo Herram, realizó un estudio regional de los Valles de Toluca e Ixtlahuaca, los objetivos consistieron en evaluar las características y condiciones hidrogeológicas en los valles señalados. Asimismo, corroboraron y estructuraron el modelo hidrodinámico de la cuenca, y de ahí, delimitaron la estructura del subsuelo.

Con los datos obtenidos de las unidades hidrogeológicas, realizaron un balance de agua subterránea en ambas zonas. Los resultados obtenidos fue la cuantificación del volumen de extracción en 448 Mm^3 , con un total de 914 aprovechamientos censados entre pozos, norias y manantiales. Específicamente en la zona urbana de Toluca, censaron el aprovechamiento y las extracción con aspectos piezométricos. Para ello, realizaron una caracterización hidrogeoquímica con la finalidad de evaluar la calidad del agua, también realizaron un modelo conceptual del acuífero y finalmente realizaron un balance hídrico que integraba la evaporación real, la cual se calculó por distintos métodos empíricos (Thornthwaite, Blanney-Criddle, Turc y Penman Montheith)

En 1996, la empresa Ariel Consultores S.A. realizaron un estudio de simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de las Redes de Observación del Acuífero en el Valle; ellos determinaron un balance geohidrológico y un modelo de simulación y predicción del flujo hidrodinámico. Los resultados fueron $256.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ de agua que entra a la cuenca y $342.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ de agua que se extraía en ese momento; con un cambio de almacenamiento de -85.5 Mm^3 .

Diez- Pérez (2009) propuso alternativas de administración racional de recursos hídricos en un acuífero sometido a sobreexplotación, Valle de Toluca. El objetivo del trabajo era obtener una propuesta de alternativas de administración en un acuífero sometido a extracción excesiva, que permitan su explotación de una manera integral. Para ello, empleo un modelo matemático *MODFLOW*, éste bajo distintos enfoque de aplicación (ambiental, económico social y simulación con modelos matemáticos), determinando un diagnostico del estado del acuífero mediante los datos de multipiezómetros disponibles y las modificaciones que han tenido los flujos verticales.

También hizo uso de datos de la extracción de agua que aparecen en los censos de aprovechamiento disponibles. Obteniendo como resultado dos propuestas de cambio en la ubicación de pozos: *i*) Cambio de aprovechamiento del valle hacia nuevos pozos en el occidente, y *ii*) desplazamiento del de la extracción de algunos pozos situados en el centro de valle hacia ubicaciones al Norte de la cuenca. él concluye, de continuar con la extracción actual (213 L/p/d) el abatimiento en los niveles piezométricos será de 5m en el este del valle, y en el resto de la cuenca los cambios no serán tan significativos.

Por otra parte Calderhead (2009) cuantificó la recarga en la cuenca a través del modelo HELP3 desarrollado por Schroeder *et al.*, (1994), el objetivo del trabajo fue cuantificación de la recarga de forma espacial y temporal. Para ello, el autor hizo uso de 16 variables (precipitación, temperatura media, radiación solar, humedad relativa, latitud, cobertura vegetal del suelo, curvas de pendientes, evaporación, coeficiente de infiltración, capacidad de campo, conductividad hidráulica y el límite del acuífero) del procesamiento de los datos en el software Calderhead (2009) obtuvo una recarga de $376.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$, concluyendo que la mayor tasa de recarga ocurre en la sierra de las Cruces y en los volcanes Guadalupeana y Nevado de Toluca.

Finalmente Ortiz-Madrid (2010) estimó la recarga del acuífero del Valle de Toluca mediante la aplicación de herramientas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). El objetivo de la investigación consistió en estimar la recarga por cuerpos de agua y la precipitación. Para ello, consideró las características topográficas, climatológicas y el uso del suelo. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: la recarga es constante y localizada por los cuerpos de agua; el aporte en la recarga de éstos fue del orden de $56.87 \text{ Hm}^3/\text{año}$; mientras la recarga por precipitación fue de $318.65 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Concluyendo que la recarga inducida por fugas de agua es muy importante.

2.6 Síntesis de los estudios previos

Los primeros estudios se realizaron en la cuenca del Valle de Toluca, iniciaron en los años 60's, éstos se centraron en la caracterización superficial del acuífero, en la captación del agua superficial de los manantiales de la cuenca y en la instalación de algunos pozos, específicamente en las zonas de las lagunas. En ese mismo año se empezó a instalar el corredor industrial Toluca- Lerma, donde se desarrollo y se está desarrollando una intensa actividad industrial, esta actividad conllevó y conlleva un aumento de la densidad de la población en el valle y del agua misma. Derivado de la actividad industrial y del crecimiento humano, el volumen de extracción incrementó y la disponibilidad se redujo, por lo que en 1965 se decreto en veda el acuífero, pero en ese mismo año se incrementaron las necesidades hídricas de los habitantes de la ciudad de México y Toluca y se firmo un contrato para extraer más agua de la cuenca.

En los años 70's se concluyeron las obras de 230 pozos y se instalaron piezómetros para medir el abatimiento, posteriormete en los años 80's ya había un abatimiento de 70 *m* en donde está ubicada la zona industrial, mientras que en la parte central de la cuenca éste osciló en 10 y 20 *m*.

Hacia los años 90's los estudios se fueron complementando con los estudios anteriores. En este año ya se realizaron balances hídricos los cuales consistían en evaluar la recarga procedente de la precipitación de la cuenca, para ello consideraron información de estaciones meteorológicas para estimar la precipitación promedio, el escurrimiento y la evapotranspiración real fueron estimados mediante formulas empíricas, y de esa manera obtuvieron datos del agua que se puedo recargar en la cuenca.

Para los años 2000 - 2010 ya se generaron modelos matemáticos que de cierta manera se ha permitió medir y proyectar el abatimiento de los niveles piezométricos, asimismo se generó y se trabajo con datos de la población. En años recientes se ha estimado la recarga mediante distintos softwares (Help3, e Idrisi) y se han considerado distintas variable (cuerpos de agua, radiación solar) que han permitido hacer una cuantificación de la posible tasa de recarga en la cuenca.

Capítulo III

Factores y estimación de la recarga regional en regiones sub-húmedas

3.1 Introducción

En el estudio de las aguas subterráneas la palabra recarga tiene distintos significados (Jyrkama, 2003). En este contexto, la recarga se puede entender como el proceso mediante el cual el agua llega al acuífero por medio de la filtración o por transferencia de agua de otro acuífero o acuitardo (Custodio 1998). En la presente investigación, el término recarga se puede entender como el agua que se infiltra en la superficie del suelo procedente de la precipitación.

La fuerza motriz de la recarga es la precipitación. De acuerdo con Scalón *et al.*, (2002); Custodio (1997) y Simmers (1990) la recarga puede dividirse en tres procesos: *(i)* recarga difusa, ésta es por precipitación o riego; *(ii)* recarga localizada: se presenta en las depresiones de la superficie topográficas, tales como arroyos, laguna y lagos; *(iii)* recarga preferencial: ésta se presenta en grietas, fisuras y fallas y su contribución al acuífero es casi instantánea.

La recarga debido a la precipitación constituye una de las fuentes de mayor contribución al sistema de aguas subterráneas. La precipitación se forma como lluvia o nieve antes de llegar al suelo, una parte de ésta se escurre superficialmente y va a dar directamente a lagos y ríos, otra parte es absorbida por la vegetación y el resto se infiltra (Delgado-Ramos 2006). Una de las metodologías más empleadas para estimar la recarga por precipitación es un balance hídrico. En la figura 3.1 se puede apreciar el esquema general del balance hidrológico con los distintos componentes que integran el balance en la superficie, zona saturada y no saturada.

3.2 Métodos para estimar la recarga

Emplear la técnica apropiada para estimar la recarga es un factor que va a depender de los objetivos de la investigación. En la tabla 3.1 se muestra algunas de las técnicas más utilizadas para estimar la recarga, en zonas con climas húmedo, áridos y semiárido, así como las diferentes métodos para estimar la recarga. De acuerdo con Martínez *et al.*, (2002) la elección de una metodología depende del contexto de la investigación y de la información disponible.

3.2.1 Método de trazadores

A partir de los años ochentas un sin fin de estudios han centrado sus objetivos en el uso trazadores químicos e isotópicos (Wood y Sanford, 1995), radioisótopos; (Phillips *et al.*, 1988), artificiales (Flury *et al.*, 1994) y de calor. De acuerdo con Constantz *et al.*, (1994) con la técnica de los trazadores no se puede obtener directamente la cuantificación de la recarga, porque pueden existir ciertos inconvenientes al hacer la interpretación de los resultados.

No obstante, los trazadores pueden utilizarse para caracterizar el flujo preferencial. Los trazadores más utilizados son aquellos que contemplan el aporte de sales por precipitación; este proceso tiene aportes tanto en el agua de lluvia y en las partículas del polvo, ya que la parte soluble de éstos se incorporan a las partículas del agua una vez que esta ha caído sobre el suelo.

El ion cloruro es uno de los trazadores más utilizados para estimar la recarga. Una de las técnicas más utilizadas es el balance de masa de cloruros (BMC). Esta técnica se puede emplear en la zona saturada y no saturada. Originalmente el balance fue utilizado para estimar la recarga en la zona no saturada en la llanura costera de Israel por Erisson y Khunakasem en 1996 (Scalon *et al.*, 2002)

Con las técnicas de trazadores químicos ambientales, se estima el valor medio de la recarga en largos periodos de tiempo (específicamente en años) (Wood y Sanford 1995). Las técnicas de trazadores artificiales mediante colorantes, radioisótopos y trazadores químicos se utilizan habitualmente para estimar la recarga en la zona saturada y no saturada (Samper y Guimerá 1991)

3.2.2 Técnicas de medición directa

Este método requiere del uso de tecnología especial (lisímetros y medidores de filtración) para medir a profundidad el flujo que se dirige hacia el nivel freático. Generalmente estos métodos son utilizados para medir el volumen infiltrado de arroyos, ríos y canales, entre otros. Como la mayoría de los métodos de recarga, esta técnica es más apropiada emplearla en zonas con climas húmedos (Allen *et al.*, 1991)

A pesar de su elevado costo de construcción y mantenimiento estos métodos, no siempre proporcionan la magnitud de la recarga debido a que la construcción de los lisímetros alteran las condiciones iniciales del suelo y afectan los resultado. La ventaja de este método es la cuantificación de la recarga de manera directa. Emplear este método permite utilizar una escala variable de tiempo (instantáneo, estacional o anual) (Scalon *et al.*, 2002)

3.2.3 Métodos hidrodinámicos

Se basan en la utilización de la ecuación de flujo, bajo condiciones de saturación parcial o total. Estos métodos pueden ser de campo o numéricos. Los primeros suelen suponer regímenes estacionarios y funcionan mejor para el flujo de la zona saturada, este método es más sencillo, mientras los segundos permiten abordar situaciones más complejas, la cual permite analizar situaciones complejas de régimen transitorio o de heterogeneidad espacial. Éstos requiere un gran número de datos que no siempre están disponibles (Scalon *et al.*, 2002)

3.2.4 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un SIG es un sistema asistido por computadora y proporciona una plataforma integrada para la adquisición, procesamiento, análisis y visualización de los datos. Hoy, se encuentran disponibles una gran variedad de software para asistir diversas tareas. Con las herramientas de un SIG se puede ayudar considerablemente en la modelación, procesamiento y la calibración de los datos (Goodchild *et al.*, 1993).

En el manual del SIG Idrisi (Eastman; 2009) se describen lo siguiente: los datos geográficos son almacenados y representados en dos formas básicas en vector y raster. El vector almacena información en forma de puntos, líneas y polígonos utilizando las coordenadas Altitud y Longitud o en la malla de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM). En este formato se forma una representación grafica de las características terrestres. Los atributos de esas características son almacenados es un software tradicional de gestión de base de datos. El formato permite estructurar y procesar los datos acorde a la realidad de la superficie terrestre. Estos sistemas son bastante eficientes en el almacenamiento de datos cartográficos, ya que solo guardan los límites de las características.

En el formato raster, la representación geográfica de las características y atributos que éste posee se mezclan con archivos unificados. Por lo general no se definen las características, más aún, el área de estudio se divide en una fina red de celdas en las que se guardan las condiciones o atributos de la superficie terrestre. A cada celda se le asigna un valor numérico, el cual representará un identificador o un código atributivo (cuantitativo o cualitativo) de las características de la superficie terrestre.

A pesar de los datos que se almacenan en estas celdas no necesariamente se refieren al fenómeno que se puede observar en el ambiente, la malla de los datos se puede interpretar como imágenes o capas, cada una ilustra información diferente sobre la región comprendida en el archivo. Esta información puede ser visible a través de un visualizador raster. En los archivos raster el espacio geográfico está uniformemente definido de manera simple y predecible.

3.2.5 Balance de masas

De acuerdo con Samper (1999) el método consiste en la aplicación de la conservación de masa. El balance hídrico se suele realizar de forma periódica, diaria, mensual, anual o en periodos prolongados de tiempo. Este balance se suele estimar en la zona más superficial del terreno, donde tienen lugar los procesos de evapotranspiración, escurrimiento e infiltración.

De acuerdo con Scalon *et al.*, (2002) el balance de agua en un acuífero se establece en función de los factores climatológicos y de la disposición de los datos. Por otro lado, la escala temporal tiene un papel importante ya que de esta se determina la duración de cada evento en la infiltración. El método de balance hídrico es el más utilizados debido a diversas ventajas que este presenta: *i*) la disponibilidad de datos iniciales (pluviometría, niveles piezométricos, caudales, etc.); *ii*) la facilidad, y la rapidez de aplicación y el reducido costo de ejecución; *iii*) el hecho de considerar todas las fuentes o sumideros de agua conduce a que sea menor la interpretación de los mecanismos que controlan cada uno de los términos del balance; *iv*) su aplicabilidad a todo tipo de fuentes de recarga y *v*) pueden aplicarse a múltiples escalas y espacios temporales.

3.2.6 Consideraciones preliminares para realizar el balance de masas

Los procesos hidrológicos habituales que intervienen en el ciclo hidrológico pueden considerarse a diversas escalas y espacios temporales. Por tal motivo, es preciso realizar un análisis de los datos antes de ser procesados. Uno de los métodos más empleados para evaluar la recarga es el método del balance hídrico, su principal objetivo es cuantificar directamente el agua que se infiltra y que puede llegar hasta el nivel freático.

En la práctica sólo alguno de estos componentes puede ser medido directamente, tal es el caso de la precipitación, la temperatura máxima y mínima, mientras que el resto deben ser estimados indirectamente mediante formulas empíricas, (evapotranspiración potencial ETP y la evapotranspiración real ETR).

La estimación de los términos del balance suele incluir errores de medición, de interpretación y de procesamiento, situación que provoca que el balance no cierre de forma exacta. El balance puede incluir conjuntamente agua superficial, subterránea u otra porción así como componente del ciclo hidrológico. Para estimar la recarga, se suelen realizar balances en el suelo superficial (Samper y García- Vera, 1997), en el acuífero (Samper, 1997a), en un tramo de río comprendido entre dos estaciones de aforo (Sahuquillo, 1997), y en lagos y embalses (Giráldez y López-Rodríguez, 1997).

Cuando se realizan balances parciales se debe comprobar la corrección y coherencia entre los flujos de agua en sus distintos componentes. La estimación de la recarga a partir de balances en el acuífero puede realizarse posteriormente a partir de modelos numéricos de flujo (Samper, 1997b; Carrera *et al.*, 2008), éstos permiten reconstruir el régimen hidrológico natural a partir de datos meteorológicos, de características físicas de las cuencas y de datos registrados en estaciones de aforo o en piezómetros.

De manera general, son variados los factores que afectan y contribuyen en la tasa de recarga. Emplear una técnica apropiada para estimar los factores que interactúan es ella es a menudo difícil, ya que los mecanismos que interactúan en éstas son variados en espacio y tiempo. A continuación se hace una descripción breve de los factores que interactúan en la recarga.

Tabla 3.1. Técnicas para estimar la recarga en distintas regiones con climas húmedos, áridos y semiáridos

| Zona Hidrológica | Técnica | |
|------------------|--|---|
| | clima árido y semiárido | clima húmedo |
| Agua superficial | Balance de agua en: ríos, canales y arroyos | Balance de agua en: ríos, canales y arroyos |
| | Trazadores ambientales | Trazadores ambientales |
| | Trazadores isotópicos | Flujo base de descarga |
| | Modelos numéricos hidrográfica | Trazadores isotópicos |
| | Balance hídrico | Modelos numéricos hidrográfica |
| | Infiltrómetros | Balance hídrico |
| | Descarga del flujo base | infiltrómetros |
| | Trazadores térmicos | Trazadores térmicos |
| | Lisímetros | |
| | Ley de Darcy | Lisímetros |
| Zona no saturada | Trazadores históricos (^{36}Cl , ^3H) | Ley de Darcy |
| | Ion Cloruro | Trazadores artificiales |
| | Trazadores artificiales | Modelos numéricos |
| | Modelos numéricos | |
| Zona saturada | Trazadores históricos (CFC, ^3H , ^3He) | Modelación numérica |
| | Trazadores ambientales (Cl, ^{14}C) | Fluctuaciones en el nivel piezométrico |
| | Método de fluctuación en el nivel freático | Ley de Darcy Trazadores históricos (CFC, ^3H , ^3He) |

Fuente: modificado de Bridget et al., 2001.

3.3 Factores que interactúan en la tasa de recarga

3.3.1 Precipitación

De acuerdo con Aparicio (2005) la precipitación es una de las fuentes primarias de agua de la superficie terrestre, ésta es uno de los pocos componentes dentro del balance hídrico que se puede medir de manera sencilla a través de distintas herramientas (pluviómetros o pluviógrafos) e imágenes de satélite. Este parámetro es quizá el más importante para realizar el proceso de estimación. La precipitación es uno de los elementos fundamentales dentro del ciclo hidrológico y proporciona eventualmente la cantidad de agua que se puede infiltrar en el sistema (Lerner *et al.*, 1990)

3.3.2 Infiltración

De acuerdo con Alcalá (2005) la cantidad de infiltración está en función de la intensidad de la precipitación, la duración del evento y su distribución espacio-temporal; esta última influye básicamente de dos formas: *i)* si la intensidad de la precipitación es mayor que la tasa de infiltración, se inicia la escorrentía superficial, y con ella disminuye la cantidad de agua que potencialmente puede infiltrarse. *ii)* si la intensidad de la precipitación es muy fuerte y la textura del suelo es irregular, se puede originar una compactación que impide la infiltración. La influencia de estas características puede ser modificada por el tamaño de las gotas, el ángulo de incidencia y la forma de la precipitación (agua o nieve). De acuerdo con Lerner *et al.*, (1997) la baja intensidad de la precipitación no causa recarga debido a la alta tasa de evapotranspiración; mientras, la precipitación constante en tiempos cortos es suficiente para que se inicie la recarga.

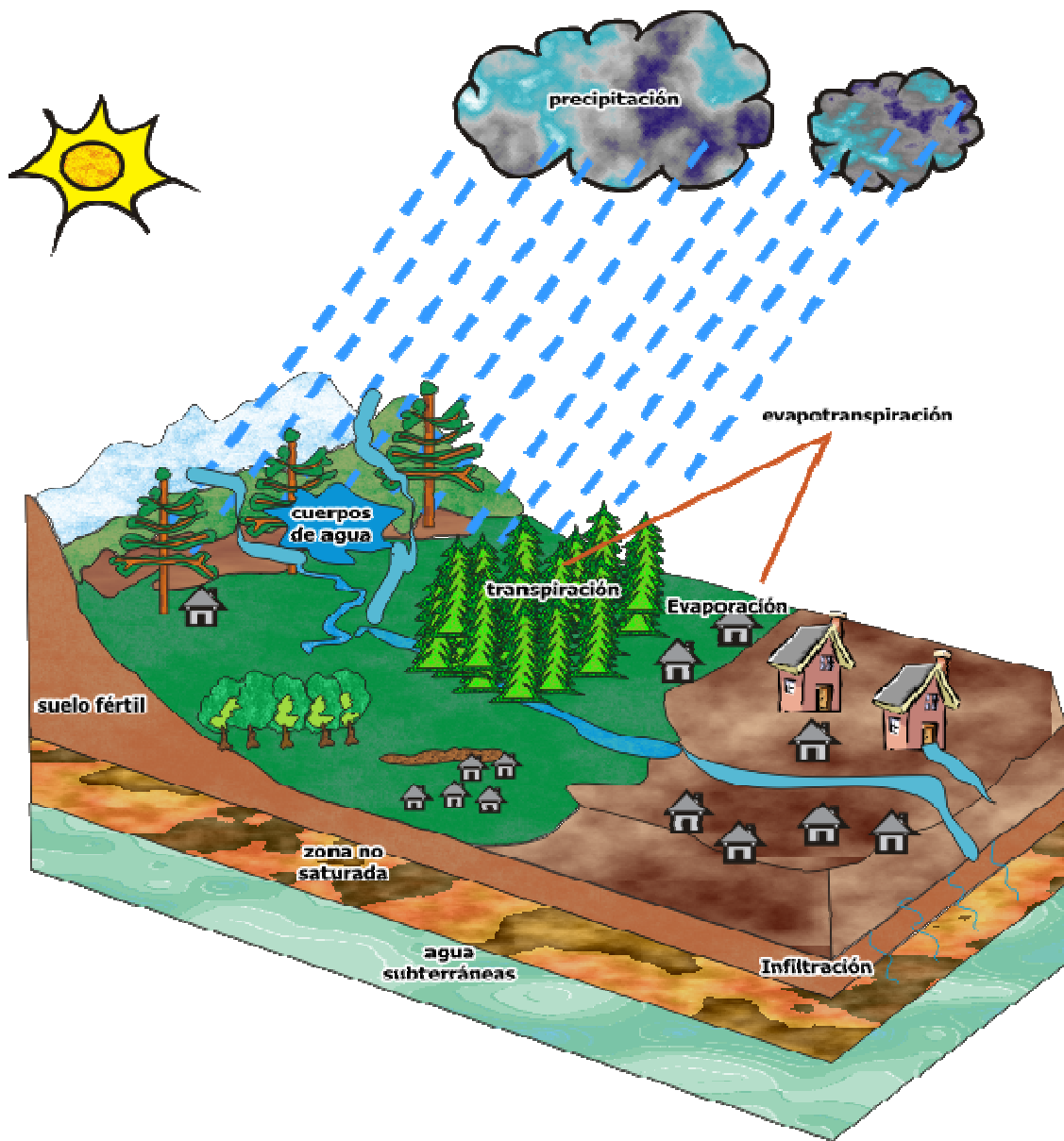


Figura 3.1 Esquema general del ciclo hidrológico, donde destacan los distintos componentes que integran el balance hídrico en la superficie, en la zona no saturada y saturada (modificado de Jyrkama, 2001)

3.3.3 La influencia de la vegetación en la infiltración

La vegetación es un factor fundamental de gran importancia en la recarga, ésta interactúa de diversas maneras dentro del balance hídrico. La cubierta vegetal intercepta la lluvia, parte de ésta se evapora y la otra escurre en forma de caudal hacia aguas abajo (Le Maitre *et al.*, 1999). La vegetación disminuye el paso del agua hacia el acuífero, porque parte del agua es retenida y consumida por las plantas (Jyrkama, 2003).

La vegetación en la recarga puede ser positiva o negativa; una de las causas por las que actúa de manera negativa, es porque las plantas captan el agua de lluvia y la transpira a través de la raíz. Sin embargo, las raíces de las plantas pueden incrementar la tasa de recarga mediante la creación de macroporos que guían el agua hacia el nivel freático. Las raíces crean flujos preferenciales que fluyen a través del perfil del suelo (Le Maitre *et al.*, 1999). Estudios recientes han revelado que además de la absorción, las raíces pueden exudar agua en respuesta a los gradientes del potencial hídrico (Burgess *et al.*, 2001).

3.3.4 La importancia de los bosques en la recarga

La importancia de los bosques radica en la regulación del clima. Una densa superficie boscosa conserva mayor humedad que una ladera descubierta. Los bosques contribuyen a que sea más fácil llegar a un punto de saturación atmosférico para que se provoque la precipitación. La presencia de los bosques es decisiva en la definición de microclimas, (Goslee *et al.*, 1997)

El efecto que ejerce el bosque en la recarga es importante. Las gotas de agua de la lluvia son interceptadas por las hojas de los árboles una parte del agua es transpirada por las hojas y otra se desplaza lentamente por el fuste y tronco de los árboles, hasta llegar a la capa del suelo forestal compuesta por hojas y materia orgánica en descomposición. Las copas de los árboles impiden el impacto directo de la lluvia sobre el suelo; esto permite mantener la porosidad del suelo para que se lleve a cabo la infiltración. Por regla general, mientras más finas sean las partículas y mayor la proporción de materia orgánica la captación del agua puede ser mayor (Jeffries *et al.*, 1990)

La existencia de áreas boscosas evita la erosión hídrica y eólica del suelo, ya que las raíces de los árboles sujetan el suelo y la capa fértil (humus) aprieta el suelo de tal modo que no se quede expuesto a las condiciones hidroclimáticas. La capa forestal, influye en la cantidad de escurrimiento, éste, es menor en las zonas donde hay árboles e incrementa en las zonas que están recubiertas por asfaltos u otro material de compactación (Jeffries *et al.*, 1990)

3.3.5 Efectos del crecimiento urbano en el ciclo hidrológico

La urbanización y el desarrollo industrial son fenómenos inseparables, ambos conllevan a un aumento significativo en el consumo de agua potable. Hasta hace algunas décadas el impacto de la urbe era poco significativo; no obstante, el crecimiento urbano ha experimentado un gran incremento en las últimas décadas. Este crecimiento ha ocasionado que las ciudades sean consideradas como focos de contaminación de origen antropogénico.

El incremento de la mancha urbana, altera los microclimas que predominan en la ciudad (Lerner *et al.*, 1990). Un microclima puede desarrollarse en los grandes centros urbanos, originando cambios en la temperatura, la humedad, la velocidad del viento, entre otros (Hall, 1984). Otro factor que también es alterado por tal crecimiento, es el escurrimiento superficial. El escurrimiento se incrementa por la impermeabilidad del suelo, por lo tanto, la recarga de aguas subterráneas en la urbe debido a la precipitación se reduce (Burger *et al.*, 1998; Rose y Peters, 2001).

En la mayoría de los centros urbanos se extrae agua subterránea para saciar sus necesidades hídricas. Dentro de estas zonas se puede llevar a cabo una recarga indirecta o inducida a través de fosas sépticas, por fugas en los sistemas de distribución de agua potable y por el exceso de riego de jardines (Lerner, 2002). Sin embargo, determinar la distribución exacta espacial y temporal de este tipo de recarga es complicado y a veces difícil de explicar (Yang *et al.*, 1999).

3.4 Degradación del suelo

La degradación del suelo, de acuerdo con Cruse *et al.*, (1991), puede ser entendida como alteraciones a la estructura y/o geomorfología del suelo; ambas determinan la tasa de infiltración, el flujo y el almacenamiento del agua, entre otros. El deterioro de la estructura del suelo puede producir compactación y cambios en las propiedades físicas y químicas. El cambio en la morfología se debe a los distintos procesos de erosión y se manifiesta en la composición y espesor del suelo.

Como cualquier otro recurso natural, el suelo es tan frágil, que puede perderse fácilmente. Los distintos usos pueden afectar negativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas; en particular, se reduce la capacidad de autorregulación del sistema. De acuerdo con Pulid-Bosch *et al.*, (2000) las características físicas y químicas pueden afectar la viscosidad y la turbidez del agua. La primera afecta el movimiento del agua a través del suelo, la segunda, facilita el sellado de los poros del suelo y favorece la escorrentía.

3.4.1 Degradación Física del suelo

El impacto de la degradación física en el suelo, es de manera indirecta al inferir directamente con el balance hídrico y en la capacidad de las plantas para retener agua. La degradación física natural comprende la erosión hídrica, eólica, la disminución de los estratos del suelo, la compactación del suelo, la incrustación de sales procedentes de los fertilizantes y la disminución de la materia orgánica (Stocking; 1994)

Según Stocking; (1994) La erosión del suelo es uno de los procesos más severos dentro de la degradación física, estos efectos son irreversibles y difíciles de remediar. De acuerdo con Nishimura *et al.*, (1990); Miller *et al.*, (1992) la disminución en la profundidad del suelo o de la capa fértil debido a la erosión se traduce en la pérdida de arcilla y materia orgánica, por consiguiente la retención de agua también disminuye. Del mismo modo, la formación de capas impermeables superficiales se traduce en una disminución en la conductividad hidráulica.

3.4.2 Degradación Química del suelo

De acuerdo con Noble *et al.*, (2001) el impacto de la degradación química del suelo en la producción de agua es predominantemente y de forma directa. La reducción de las zonas de cultivo y de las áreas forestales reduce la capacidad de infiltración. Una de las causas de la degradación química es la pérdida del suelo orgánico. La materia orgánica actúa como un sustrato macro y micro de la flora y fauna, éste, interviene en el sustento de los nutrientes y el intercambio catiónico de los ecosistemas.

3.4.3 La interacción de los ecosistemas agrícolas en la recarga

Los agroecosistemas son los paisajes naturales que han sido modificados por los seres humanos para la agricultura. Estos ecosistemas cubren alrededor del 25% de la superficie terrestre (FAO, 2001). Alrededor del 40% de la población mundial vive en agroecosistemas de riego que se mezcla con la agricultura de temporal.

La expansión de los cultivos en los últimos años ha significado que más del 50% de las principales cuencas fluviales estén bajo la cubierta agrícola (WRI, 2000). Los métodos no sostenibles del suelo agrícola están disminuyendo la capacidad de carga de los acuíferos, las causas principales de la degradación son: *i*) el aumento de la demanda de alimentos para una población en rápido crecimiento demográfico; *ii*) las políticas agrícolas inapropiadas, tales como los subsidios mal diseñados para el agua, los fertilizantes y agroquímicos; *iii*) el uso de maquinaria agrícola y las prácticas agronómicas que no se ajustan a las condiciones locales; *iv*) la concentración de ganado en zonas cubiertas de pastizal; *v*) la pérdida de la vegetación natural y; *vi*) la infraestructura mal construidas, que conduce a la fragmentación de la tierra, la erosión del suelo y alteraciones de los sistemas hidrológicos, (Penning, 2003).

Capítulo IV

Análisis y cuantificación espacio-temporal de la recarga

4.1 Introducción

El agua subterránea es una de las fuentes principales para suministro hídrico de la población, por lo anterior, es importante realizar la cuantificación de la recarga en un acuífero sometido a sobreexplotación, como lo es el acuífero del Valle de Toluca. Es importante mencionar, en este acuífero se han realizado innumerables investigaciones en torno al tema.

En un acuífero sobreexplotado, es necesario estimar la recarga con variables dependientes del agua subterránea y con las que se permiten que se efectúe la infiltración, por lo anterior y para fines de comparación, en la presente investigación se cuantificó la recarga temporal del acuífero por dos metodologías; la primera considera un balance tradicional con la metodología que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000) y el segundo es un balance hidrometeorológico estimado mediante distintas herramientas en un Sistema de Información Geográfica.

En el primer método se hace uso de fórmulas empíricas para obtener los promedios la temperatura, precipitación y escurrimiento, con respecto a la evapotranspiración real se estimó la ETR con la fórmula de Turc y posteriormente se hizo un ajuste a ésta. En el segundo método se hace la distribución espacial de la temperatura, precipitación, escurrimiento y la evapotranspiración real, también se evaluaron los cambios temporales del uso del suelo para los años de estudio y se cuantificó la recarga con la interacción del crecimiento urbano y la deforestación, finalmente se hizo la proyección de estos uso con el fin de estimar la interacción en la posible tasa de recarga en el 2015-2020 y 2025.

4.2 Modelo de Elevación Digital (MED)

Para conocer la fisiografía de la zona de estudio fue necesario emplear el Modelo Digital de Elevación (MED) que cubre la cuenca del Valle de Toluca; éste se obtuvo de la página *Seamless Data Distribution System, Earth Resources Observation and Science del US Geological Survey (USGS, 2008)*. El MED fue delimitado de acuerdo a las siguientes coordenadas: en la esquina superior izquierda $101^{\circ}44'$ W de longitud, y $19^{\circ}04'$ N de latitud y en la esquina inferior derecha con una longitud de $99^{\circ}09'$ W, y una Latitud $18^{\circ}96'$ N. Éste se bajó en formato GridFloat, una vez descargado, se importó a Idrisi con el comando ArcRaster.

La imagen del MED se obtuvo de un radar de apertura sintética, por lo que, las imágenes de este tipo, están sujetas a varias anomalías, entre las que destacan; sombras y algunas causas específicas del radar. En la imagen raster existían valores de altitud de -9999 en algunos píxeles, los cuales en algunas ocasiones llegan a abarcar zonas muy extensas y por consiguiente existen valores que alteran la calidad de la imagen y de la información; o lo que es lo mismo, existen huecos los cuales fue necesario corregir; esto se realizó mediante un macromodelo en Idrisi, el cual se basa en una representación gráfica de datos y módulos o funciones analíticas (Guerra Cobián, 2007). Para el desarrollo del macro modelo, se emplearon los módulos de Idrisi: Reclass, Overlay y Filter. En el filtrado, se utilizó la opción "Adaptive box filter" con un tamaño de 7×7 en las celdas. La información que se introdujo en el macro modelo fue la imagen raster del MED y se obtuvo una imagen nueva con los huecos corregidos.

El MED ha sido obtenido a una resolución de 3 minutos, esto equivale a una resolución de 90 m, el cual, tiene celdas de 90 x 90 m; es pertinente mencionar, para efectos de este proyecto se modificó la resolución dejando el tamaño del pixel de 30 x 30 m, ello se modificó con las expresiones 4.1 y 4.2; cambiada la resolución y el tamaño del pixel, el siguiente paso fue transformar las coordenadas LATLONG (latitud-longitud) a coordenadas UTM (Universal Trasversal de Mercator).

Finalmente, se delimitó la zona de estudio, éste se realizó en función de los límites físicos de la cuenca (Río Lerma y la presa Antonio Álzate). Estos límites fueron retomados de (Garfias *et al.* 2002 y Garfias *et al.* 2008). La delimitación consistió en retomar el Modelo de Elevación Digital y ahí se identificaron y marcaron los límites ya mencionados, posterior mente se hizo uso del comando Watershed en el software Idrisi para obtener el límite de la cuenca del Valle de Toluca. En el siguiente capítulo se puede apreciar la imagen del de Modelo de Elevación Digital recortado al límite de la cuenca de estudio.

$$N^{\circ} \text{Columnas} = \frac{X_{\max}}{X_{\min}} - \frac{X_{\min}}{\text{resolución}} \quad (4.1)$$

$$N^{\circ} \text{renglones} = \frac{X_{\max}}{\text{resolución}} - \frac{X_{\min}}{\text{resolución}} \quad (4.2)$$

4.3 Análisis de la información hidroclimatológica

4.3.1 Estaciones climatológicas

Esta sección se subdivide en dos etapas. En la primera se hace la descripción de la forma de optimizar la base de datos y en la segunda consta del método empleado para completar las series de datos faltantes en las estaciones meteorológicas.

En la primera etapa se procedió a delimitar las estaciones correspondientes a la zona de estudio; los parámetros retomados de las bases de datos fueron: la precipitación, la temperatura máxima y mínima, esta información fue retomada de la base de datos de la Información Histórica de Estaciones Climatológicas Tradicionales (CLICOM)

La delimitación de la base de datos consistió en hacer uso del límite de la cuenca del Valle de Toluca, éste se realizó en el software de Idrisi y se exportó como shape al software de Arcmap, posteriormente se retomó el archivo que contenía las estaciones climatológicas. Dentro del límite de la cuenca existen 33 estaciones meteorológicas, de este total, se eliminaron las estaciones que no tenían datos completos para los años en estudio.

Otra forma de optimizar el número de estaciones fue consultar la tesis de Vilchis-Francés (2007) en esta tesis se efectuó un estudio para optimizar la red de estaciones climatológicas dentro del Estado de México. Consultar esta tesis permitió agilizar el análisis de la base de datos de las estaciones porque en la investigación existe un listado de estaciones con las que se pueden trabajar datos meteorológicos. Es importante mencionar, en los trabajos de interpolación es necesario considerar estaciones que se encuentren a 5 kilómetros fuera del límite de la cuenca tal y como lo recomienda Izquierdo y Márquez (2006). Del tratamiento y comparación de la base de datos, se seleccionaron 17 estaciones, de las cuales 12 están dentro de la zona de estudio y 5 se encuentran fuera de la periferia del límite de la cuenca. La distribución de las estaciones se puede apreciar en el siguiente capítulo.

4.3.2 Proceso para completar la serie de datos faltantes de la precipitación y temperatura

Como ya se mencionó con anterioridad, se estableció una base de datos compuesta de 17 estaciones meteorológicas que cubre los datos de los periodos en estudio. Con cuyos valores se obtuvo la precipitación y la temperatura anual para cada periodo en estudio. La base de datos de cada parámetro antes mencionado, fueron corregidas estadísticamente por el método de promedios ponderados por correlación; este método consiste en asignar como valor de ponderación el coeficiente de correlación de Pearson (R), el cual es diferente en cada combinación. En el siguiente capítulo se puede apreciar gráficamente los valores faltantes y los valores corregidos estadísticamente.

4.4 Método para estimar la tasa de recarga en el acuífero del Valle de Toluca

El balance hídrico es una herramienta útil para estimar la disponibilidad de agua en las cuencas hidrológicas. La ecuación fundamental para llevar a cabo este balance es la ecuación de continuidad; ésta comprende el registro de las entradas, salidas y el cambio de almacenamiento del agua, (Lafragua *et al.*, 2003), la diferencia entre la suma total de las entradas y la suma total de las salidas representa el volumen de agua perdido o ganado anualmente.

Dicho de otra manera, las entradas constituyen la recarga total, las salidas representan la descarga total y el cambio de masa es el cambio de almacenamiento en el acuífero, lo anterior se puede representar con la siguiente expresión.

$$\text{Suma de entradas} - \text{Descarga total} = \text{Cambio de almacenamiento} \quad (4.3)$$

La expresión anterior, es una representación general de como ocurre la recarga en la unidad hidrogeológica. Las diferentes impulsiones que considera la ecuación de balance de agua subterránea que afecta el cambio de almacenamiento, está definida de acuerdo a la siguiente expresión (CONAGUA, 2000)

$$E_h - R_t + R_v + R_r + R_i - S_h - D_m - B = \pm \Delta V_s \quad (4.4)$$

Donde:

- E_h = Entrada horizontal de agua subterránea (Hm^3)
- E_t = Evapotranspiración (Hm^3)
- R_v = Infiltración en el terreno procedente de la precipitación (Hm^3)
- R_r = Infiltración por retorno de riego agrícola (Hm^3)
- R_i = Recarga inducida o artificial (Hm^3)
- S_h = Salida horizontal de agua subterránea (Hm^3)
- D_m = Descarga de agua subterránea a ríos, manantiales (Hm^3)
- B = Extracción (bombeo) de agua subterránea (Hm^3)
- ΔV_s = Variación en cambio de almacenamiento (Hm^3)

Despejando la fórmula se tiene la expresión (4.5) (CONAGUA; 2002) misma que es comunmente empleada para cuantificar la recarga

$$R_v = B + S_h + D_m - \Delta V_s - E_h - R_r \quad (4.5)$$

Sin embargo en la ecuación general que establece la norma, no se consideran los parámetros climatológicos, únicamente consideran la recarga total con la suma se la salida a través de manantiales, por flujo subterráneo horizontal y el bombeo, menos el cambio de almacenamiento, entradas por flujo subterráneo horizontal y el retorno por riego. Los parámetro antes mencionados son estimados de la siguiente manera: en la recarga vertical se divide la cuenca y en la zona centro de ésta estiman la recarga, para el retorno por riego consideran que un 25% del agua por irrigación se filtra y finalmente la entrada por flujo subterráneo horizontal, consideran el flujo proveniente de las zonas topográficas más altas

De manera general en muchas ocasiones el balance de aguas con la fórmula anterior, es de una forma general que permite obtener valores de recarga y en muchas ocasiones, éstos son negativos, ya que los componentes que intervienen en la ecuación en algunas ocasiones se deben ajustar.

En estudios recientes, la CONAGUA (2011) establece que es posible estimar la recarga con un balance hidrometeorológico en la superficie del acuífero, ello es con la finalidad de estimar de manera conservadora el volumen de agua susceptible a infiltrarse para que llegue al nivel freático. En la expresión siguiente se puede apreciar la interacción de las variables que intervienen en el balance, fórmula establecida por la Comisión Nacional del Agua; misma que se empleó para cuantificar la recarga regional del acuífero del Valle de Toluca.

$$R = P - Esc - ETR \quad (4.6)$$

Donde:

R = Recarga (Hm^3)

P = Precipitación (Hm^3)

Esc = Ecurrimiento natural de la cuenca (Hm^3)

ETR = Evapotranspiración real (Hm^3)

Como ya se ha mencionado con anterioridad, la expresión anterior fue empleada para estimar un balance de masas en el acuífero, ésta se cuantificó bajo dos metodologías. El primer método consistió en estimar la recarga del acuífero con estimaciones promedio de los parámetros que interactúan en la fórmula y en el segundo método se hizo la distribución espacial y temporal de los mismos parámetros. En el siguiente apartado se describe el procedimiento para obtener cada una de las variables que interactúan en el balance.

4.5 Estimación de la recarga por el método tradicional

4.5.1 Evaluación de la precipitación promedio

Completada la base de datos, la siguiente etapa consistió en estimar la precipitación promedio, ésta se estimó por tres métodos distintos: media aritmética, polígonos de Thiessen y spline. Es pertinente hacer menciones, que al hacer la estimación bajo distintos métodos empíricos permitió validar los resultados obtenidos de los otros métodos de estimación.

El primer método utilizado fue el método de la media aritmética (expresión 4.7), los datos se estimaron de acuerdo a como lo establece la expresión, por lo que se requirió trabajar con la base de datos previamente obtenida.

$$P = \frac{1}{n} \sum_i^n p_i \quad (4.7)$$

Donde:

P =Precipitación media sobre la cuenca (mm)

P_i = Precipitación para cada estación (mm)

N =Número de estaciones

El segundo método, polígonos de Thiessen, éste consiste en hacer un promedio de los valores de la precipitación en cada estación meteorológica, para ello, se asume que se tiene el mismo valor asociado a cada área del polígono. Los polígonos se crean al unir los puntos entre las estaciones y trazando las mediatrices de los segmentos de unión. Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos alrededor de cada estación meteorológica.

El procedimiento anterior, conduce a evaluar un promedio ponderado en función del área de influencia de cada polígono. Cabe hacer mención, la estimación de los polígonos se realizó para los años de estudio (1985-1996-2009), sin embargo, en el siguiente capítulo se muestra la imagen de los polígonos para el 2009, ya que los resultados varían en espacio y tiempo, pero la distribución de la precipitación es similar en los tres años. El tercer método está descrito en el punto 4.6.1 de la presente metodología.

4.5 2 Esguerrimiento natural de la cuenca estimado mediante la metodología que establece la Norma Oficial Mexicana

En este apartado, la estimación del esguerrimiento natural, se determinó conforme lo establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000) publicada en el Diario Oficial de la Federación. Misma que establece; en caso de que la cuenca bajo estudio no cuente con suficiente información para determinar el volumen anual del esguerrimiento natural, se puede utilizar el método indirecto de estimación a partir de la precipitación. Éste se puede estimar con las siguientes expresiones:

$$Esc = P' \cdot A \cdot C_e \quad (4.8)$$

$$\text{Si } K \leq 0, \quad C_e = \frac{K(P' - 250)}{2000}, \quad (4.8.1)$$

$$\text{Si } K > 0.15, \quad C_e = \frac{K(P' - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5}, \quad (4.8.2)$$

Donde:

Esc = Esguerrimiento superficial (mm)

C_e = Coeficiente de esguerrimiento anual (mm)

A = Área de la cuenca (km^2)

K = Constante que depende del tipo de cubierta vegetal y uso de suelo

P' = Precipitación promedio anual (mm)

Con la ecuación 4.9 puede ser aplicable para valores de precipitación anual entre 350 y 2150 *mm*; de acuerdo a los resultados obtenidos de la precipitación media anual y a la condicionante de la norma se puede estimar el escurrimiento natural de la zona en estudio bajo esta ecuación.

Para estimar el escurrimiento natural de la cuenca, fue necesario determinar el valor de la constante *K*, para ello, se requirió definir las características edafológicas y el uso del suelo dentro de la cuenca, por lo que se hizo uso del mapa edafológico que representa las características del suelo que predomina en la cuenca de estudio, el mapa se obtuvo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1996).

Posteriormente se reclasificó el uso del suelo en permeable, semi-permeable e impermeable, la clasificación del uso del suelo, se realizó de acuerdo a uso del suelo que establece Benítez *et al.*, (1980), paso seguido fue hacer uso de la tabla “valores de *K* en función del uso del suelo” y de esa tabla se retomaron los valores de *K*

4.5 3 Evaluación empírica de la evapotranspiración real

La estimación de la evapotranspiración es uno de los parámetro fundamentales en la cuantificación de la recarga; la importancia radica en hacer una buena estimación de ésta; por tal motivo, en la presente investigación se estimó la evapotranspiración real, a través de formulas empíricas y de imágenes de satélite; ello se realizó con el objeto de hacer una comparación de ambas metodologías

La evapotranspiración real (ETR) es el fenómeno físico de la evaporación que ocupa los macroporos del suelo y asciende por capilaridad hasta la superficie del suelo; también comprende la transpiración del agua que es extraída del suelo por las raíces de las plantas y es devuelta a la atmosfera a través de los tallos y estomas de las hojas (Murillo 2004). Esta depende de las condiciones de humedad del suelo y de la profundidad de las raíces de las plantas.

Generalmente no existen instrumentos de medición y de datos disponibles de evapotranspiración real, por tal motivo, existen diversos métodos empíricos que permiten estimar la ETR; entre los métodos empíricos más destacados se encuentran; el método de Penman Monthie, Thornthwaite, Turc, Coutange, entre otros. Los métodos antes mencionados están sujetos a un sinnúmero de variables empíricas que supeditan la calidad de la información. Por otro lado, existen métodos que permiten realizar ajustes a las formulas empíricas y algunos otros, permiten hacer una estimación de la ETR bajo la cubierta vegetal y la radiación solar.

De manera general, la estimación de la ETR depende directamente de la radiación solar, la precipitación, y la temperatura promedio; la importancia de la estimación radica en determinar la radiación solar; a menudo este parámetro dificulta el proceso de estimación. Es importante mencionar, en la presente investigación se estimó la ETR bajo las metodologías de Turc (1955) y Maderey *et al.*, (1995)

Con respecto al método empírico, Pulido (1979) alude que TURC en el año de 1955, en su tesis Doctoral, llega a una fórmula experimentada en numerosas cuencas. La determinación de la ETR la realizó de acuerdo a las siguientes expresiones, mismas que se emplearon para hacer la estimación de la evapotranspiración real en la presente investigación.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + \left[\frac{P^2}{L_2} \right]}} \quad (4.9)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (4.9.1)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración Real ($mm/año$)

P = Precipitación ($mm/año$)

L = $300 + 25T + 0.05T^3$

T = Temperatura media anual ($^{\circ}C$)

Sin embargo, distintos investigadores han confirmado la necesidad de realizar ajuste a la fórmula empírica si realiza un balance hidrológico. Maderey *et al* (1995) alude, se debe realizar un ajuste a la fórmula de Turc, si los datos de la evapotranspiración real y del escurrimiento exceden los valores de la precipitación $P = ESC + ETR$ (ESC es el escurrimiento y ETR es la evapotranspiración real). El método es simple y se basa en la estimación de la evapotranspiración real mediante la fórmula empírica y posteriormente se realiza un ajuste a esta expresión.

Inicialmente se requiere trabajar con los datos empíricos de la evapotranspiración real, la precipitación y la temperatura media anual; posteriormente se estima la precipitación promedio que entra a la cuenca, para ello, se resta el escurrimiento de la precipitación ($P - Esc$) y finalmente se determina la evapotranspiración real ajustada. Para determinar el valor del ajuste se hacen las siguientes consideraciones.

De acuerdo con Maderey *et al* (1995), el método utiliza el índice de aridez del sistema de clasificación de Köppen como un índice hidrológico. Esta aplicación fue ideada por Maderey *et al* 1991 en Maderey *et al* (1995). De acuerdo a la misma autora, el índice del sistema de clasificación climática de Köppen es de fácil aplicación y se puede considerar uno de los métodos de mayor validez hidroclimáticas porque el valor límite entre los climas secos y húmedos determina la lámina de precipitación para zonas secas y húmedas. Para determinar este índice se hizo uso de la tabla 4.1

Determinado el índice de aridez, se procede a realizar el ajuste a la fórmula de Turc, para ello se dividió la evapotranspiración real que entra a la cuenca entre la evapotranspiración real de acuerdo a Turc y finalmente se procesó la expresión (4.11) con la que se estimó la evapotranspiración real ajustada.

$$E_r = (E_p / E_{pTurc})(E_{rTurc}) \quad (4.10)$$

Donde

E_r = Evapotranspiración real ajustada (*mm*)

E_{pTurc} =Factor de ajuste

E_p =Evapotranspiración real que entra a la cuenca (*mm*)

E_{rTurc} = Evapotranspiración real estimada de acuerdo a Turc (*mm*)

Tabla 4.1 Tabla para calcular el índice de aridez estimada mediante la clasificación climática de Köppen

| <i>s</i> | <i>f</i> ó <i>x</i> | <i>w</i> |
|-----------|---------------------|---------------|
| $r = 2 t$ | $r = 2(t+7)$ | $r = 2(t+14)$ |

Fuente: retomada de Maderey et al (1995)

s = lluvias de invierno

w = lluvias de verano

f = lluvias abundantes y uniformes todo el año

x' = lluvias escasas y uniformes todo el año

t = temperatura media anual en °C

r = valor límite de precipitación media anual en *cm*

p = precipitación media anual en *mm*

4.6 Estimación de la recarga por el método hidrometeorológico

Evaluar los sistemas hidrológicos mediante herramientas en un sistema de información geográfica (SIG) es crucial para analizar y derivar una serie de conclusiones en torno al tema. El uso de sistemas computacionales facilita el análisis de la información. Un SIG permite: almacenar, procesar y analizar diferentes tipos de información (Carrica y Lexow, 2004). Agregar información a un SIG permite el procesamiento y el análisis de los datos de entrada y salida de los modelos matemáticos de simulación. (Esteller *et al.*, 2002)

4.6.1 Estimación de la precipitación por el método Spline

De acuerdo con Fiat-Panis, (2003) La interpolación es un proceso fundamental cuando la superficie de análisis tiene una resolución diferente a la resolución pedida en el estudio o cuando los datos no cubren la región de interés o simplemente existe la ausencia de datos. La interpolación de los datos se utiliza para predecir el valor de atributo en una locación precisa a partir de los valores de atributo. Se utiliza la interpolación para transformar un número y éste a su vez pueda ser comparado con los patrones espaciales para determina la ausencia de los datos.

Los métodos locales emplean datos climáticos procedentes de las estaciones meteorológicas, la predicción de los datos climatológicos en un punto determinado se realiza a través de las estaciones meteorológicas más cercanas, mediante la utilización de estos datos se formula una función matemática que es usada para predecir el valor de la variable climática en un punto dado. El proceso es continuo y termina cuando los datos son predichos en todos los puntos del área de interés. Los interpoladores locales de distancia inversa (*IDW: inverse distance weighting*) o los ajustes por curva (spline) han sido utilizados frecuentemente en la predicción de variables climatológicas (Weibell *et al.*, 1991, New *et al.*, 2000 en Franco, 2008).

Del pre-procesamiento estadístico de la base de datos se obtuvo el valor de la precipitación promedio anual para cada periodo en estudio. Para efectos de comparación y para procesar la imagen en la fórmula 4.13, se estimó la precipitación con herramientas de un SIG en Arcmap, para ello se efectuó por medio de una interpolación denominada *Spline*. Los resultados se pueden apreciar en el siguiente capítulo

4.6.2 Esgurrimiento natural estimado mediante distintas herramientas en un SIG

El escurrimiento natural de la cuenca, es un elemento fundamental para hacer la estimación de la recarga, esta variable, depende directamente de la precipitación, la evapotranspiración real y del coeficiente de escurrimiento. Para obtener el escurrimiento dentro de la subcuenta en estudio, se procedió a retomar la clasificación supervisada del suelo previamente realizada.

Subsecuentemente se hizo la clasificación para obtener la permeabilidad del suelo, para ello, también se retomaron los valores propuestos por Benítez *et al* (1980) éstos, se pueden observar en la tabla 4.2; mientras tanto, el coeficiente de escurrimiento fue obtenido a partir de la permeabilidad del suelo y del procesamiento del método que establece la Norma Oficial. Obtenido el mapa de uso del suelo y la permeabilidad del mismo, el siguiente paso consistió en obtener el mapa del escurrimiento para cada periodo de estudio, para ello fue necesaria la interacción del mapa del coeficiente de escurrimiento, el de precipitación y el mapa de los valores de la constante K.

Para estimar el escurrimiento fue necesario evaluar el uso del suelo para cada año de estudio, para realizar los mapas de uso de suelo, se requirió hacer uso de imágenes de satélite previamente obtenidas de la página de Internet <http://seamless.usgs.gov> del US Geological Survey de los EE.UU. Identificada la zona en estudio, se procedió a delimitar las imágenes que cubrían la cuenca del Valle de Toluca.

Obtenidas las imágenes, el siguiente paso consistió en corregir las imperfecciones (huecos) que presentaban las bandas, subsecuentemente se crearon mosaicos de cada una de las bandas para recortarlas al tamaño de la cuenca, posteriormente se convirtieron las imágenes a formato raster. El primer paso para realizar el mapa del uso del suelo, consistió en definir los sitios de entrenamiento para cada cobertura del suelo (bosque, urbano, pastizal, agua, agricultura y suelo con poca vegetación), para digitalizar los polígonos, se hizo una composición de las bandas 3, 4 y 5 (falso color)

Posteriormente se segmentó la zona de estudio con el comando *segmentation*, el cual tiene la finalidad de segmentar los píxeles de las imágenes de acuerdo a la similitud de la reflectancia del suelo, consecutivamente, se hizo uso del comando *segtrain* este comando unifica los píxeles. Una vez identificado los polígonos con su respectivo nombre se procedió a realizar la clasificación del uso del suelo o también conocida como clasificación supervisada, ello se realizó con el comando *maxlike* y de esta manera se obtuvo el mapa de uso de suelo.

Finalmente se procedió a realizar la evaluación del cambio de uso de suelo con el módulo *Land Change Modeler For Ecological Sustainability* herramienta desarrollada en la versión de Idrisi Andes, el objetivo del módulo es evaluar los cambios temporales del uso del suelo para preservar la biodiversidad, este objetivo no forma parte de los objetivos de la presente investigación. Sin embargo, el módulo se puede emplear para hacer la evaluación del uso del suelo para los periodos de estudio.

Tabla 4.2 Valores de coeficiente de escurrimiento según Benítez et al., (1980)

| Cobertura | Tipo de suelo | Pendiente (%) | | | | |
|--|---------------|---------------|-------|------|------|------|
| | | >50 | 20-50 | 5-20 | 1-5 | 0-1 |
| Sin vegetación | Impermeable | 0.8 | 0.75 | 0.7 | 0.65 | 0.6 |
| | Semipermeable | 0.7 | 0.65 | 0.6 | 0.55 | 0.5 |
| | Permeable | 0.5 | 0.45 | 0.4 | 0.35 | 0.3 |
| Cultivos | Impermeable | 0.7 | 0.65 | 0.6 | 0.55 | 0.5 |
| | Semipermeable | 0.6 | 0.55 | 0.5 | 0.45 | 0.4 |
| | Permeable | 0.4 | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 |
| pastos | Impermeable | 0.65 | 0.6 | 0.55 | 0.5 | 0.45 |
| | Semipermeable | 0.55 | 0.5 | 0.45 | 0.4 | 0.35 |
| | Permeable | 0.35 | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 |
| Vegetación ligera, hierba, bosque y | Impermeable | 0.6 | 0.55 | 0.5 | 0.45 | 0.4 |
| | Semipermeable | 0.5 | 0.45 | 0.4 | 0.35 | 0.3 |
| | Permeable | 0.3 | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 |
| Vegetación densa. | Impermeable | 0.55 | 0.5 | 0.45 | 0.4 | 0.35 |
| | Semipermeable | 0.45 | 0.4 | 0.35 | 0.3 | 0.25 |
| | Permeable | 0.25 | 0.2 | 0.15 | 0.1 | 0.05 |

Fuente: retomado de Benítez et al (1980)

4.6.3 Evapotranspiración real evaluada mediante imágenes de satélite

Uno de los parámetros más importantes dentro del balance de masa, es la estimación eficaz de la evapotranspiración real. Actualmente existen gran variedad de métodos empíricos que permiten estimar este parámetro. Sin embargo, todos los métodos están sujetos a los datos empíricos de cada fórmula. Por el contrario Wang *et al.*, (2007) proponen una metodología que permite estimar la ETR mediante una regresión lineal a partir de la radiación neta, R_n (W^2/m^2), la temperatura ambiente (T_a en $^{\circ}C$) y el índice de la cubierta vegetal normalizado ($NDVI$). En la fórmula 4.12 se puede apreciar la forma en que interactúa cada uno de los parámetros.

$$ETR = R_n * (a_0 + a_1 * NDVI + a_2 * T) \quad (4.11)$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real ($W m^{-2}$)

R_n = Radiación Solar ($MJ-m^2-día^{-1}$)

a_0, a_1, a_2 = Coeficientes de regresión

$NDVI_z$ = Índice de cubierta vegetal

T = Temperatura promedio ($^{\circ}C$)

a) Índice de la cubierta vegetal (NDVI)

El índice de cubierta vegetal normalizado se puede obtener del satélite *Terra*, que incorpora el sistema MODIS (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*) (Xiong *et al.*, 2009). Sin embargo, en la presente investigación no fue posible obtener el NDVI de dicha página, a causa de la ausencia del índice de cubierta para años posteriores al 2000, por tal motivo, se trabajó con las bandas rojo e infrarrojo cercano de las imágenes de satélite previamente obtenidas. En el software Idrisi, se procesaron las bandas con el comando Image procesing- transformation- vegetindex y de esta forma, se obtuvo el NDVI para cada periodo en estudio. La imagen se puede apreciar en el siguiente capítulo.

b) Estimación de la radiación solar

La radiación solar es el elemento esencial para hacer la estimación de la evapotranspiración real. La radiación es la diferencia entre la radiación entrante de longitudes de ondas largas y ondas cortas.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (4.12)$$

Donde:

R_n = Radiación neta ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

R_{ns} = Radiación neta de onda corta ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

R_{nl} = Radiación neta de onda larga ($MJ m^{-2} día^{-1}$)

Para estimar la radiación neta de onda corta se hace uso de la siguiente expresión:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (4.13)$$

Donde:

R_{ns} = Radiación neta de onda corta ($MJ.m^2.día^{-1}$)

α = Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo

R_s = Radiación solar entrante ($MJ.m^2.día^{-1}$)

Para estimar la radiación neta de onda larga se hace uso de la siguiente expresión.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max, K}^4 + T_{\min, K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14)\sqrt{e_a} \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (4.14)$$

R_{nl} = Radiación neta de onda larga ($MJ.m^2.día^{-1}$)

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} día^{-1}$)

$T_{\max K}$ = Temperatura máxima ($^{\circ}C$)

$T_{\min K}$ = Temperatura mínima ($^{\circ}C$)

E_a = Presión de vapor real (kpa)

R_s/R_{so} = Radiación relativa de onda corta (*valores ≤ 1.0*)

R_s = Radiación solar mediana o calculada ($MJ.m^2.día^{-1}$)

R_{so} = Radiación en un día despejado ($MJ.m^2.día^{-1}$)

A razón de que existen pocos instrumentos de medición de la radiación neta acumulada, se procedió a estimar la radiación neta con la fórmula 4.12, para ello, y debido a la ausencia de la información se hizo uso la información disponible, albedo, radiación solar entrante (horas de insolación) la constante de Stefan-Boltzmann se utiliza como se establece en la fórmula; la información se obtuvo de una estación observatorio ubicada al límite de la cuenca. Obtenida la radiación de onda larga, el siguiente paso consistió en estimar la radiación de onda corta y larga con la expresión (4.13) y (4.14); para ello, se determinó la densidad y turbiedad atmosférica en Idrisi.

c) Temperatura mínima, máxima y promedio

Como ya se mencionó con anterioridad, los datos de temperatura se retomaron de la base de datos CLICOM; Sin embargo, no se empleó el método *Spline* para interpolar los datos; la razón obedece fundamentalmente a que se tiene una densidad de estaciones muy baja en la zona de estudio. Además, está documentado que uno de los parámetros más importantes relacionado con el valor de la temperatura es la altitud; hecho que se debe considerar en el proceso de interpolar (Schneider, 2001). Por tal motivo, la interpolación de las temperaturas mínimas, máximas y promedio, se realizó mediante el método de proximidad con ajuste de elevación, la metodología consiste en interpolar cada una de las celdas de la imagen raster. Los resultados se pueden observar en el siguiente capítulo.

d) Coeficientes de regresión (a_0, a_1, a_2)

Estos coeficientes se retomaron de Wang *et al* (2007), para ello se estimó la temperatura promedio y el índice normalizado de la cubierta vegetal. Debido a la ausencia de datos y a la información disponible se hizo uso de los coeficientes de regresión concernientes al índice normalizado de la cubierta vegetal que propone Wang *et al* (2007). Los valores obtenidos en la investigación de Wang pueden ser aplicables para distintos tipos de cubierta vegetal y diferentes tipos de climas, es importante mencionar, dentro la metodología de Wang, existen distintos valores, ello es porque empleo el Índice de cubierta mejorado (EVI) y el Índice normalizado de la cubierta Vegetal.

4.7 Previsión del uso del suelo para el 2015-2020 y2025

En este apartado se tiene como objetivo evaluar los cambios temporales del uso del suelo, en especial de los usos del crecimiento urbano y la deforestación, para evaluar los efectos del cambio del uso del suelo en la recarga.

Por lo que se retomo la evaluación del uso del suelo ya realizada de los años de estudio y se procedió a evaluar los cambios del uso del suelo para los años 2015-2020-2025, por lo que se uso del módulo Land Change Modeler en Idrisi; inicialmente se trabajó en el módulo Change Analysis; aquí se requiere trabajar con dos periodos, para este fin, se retomó la evaluación realizada de los cambios temporales del uso del suelo de 1996 y 2009, y se hizo la evaluación y la distribución del uso del suelo.

Evalrados los cambios temporales en el uso del suelo, se prosiguió, a seleccionar el módulo Transition potentials, éste permite agrupar en sub-modelos las distintas interacciones del uso del suelo y para poder generar sub-modelos, para ello fue necesario seleccionar el comando Evidence likelihood y dar de alta los mapas de: crecimiento urbano, carreteras, pendientes del terreno, la evaluación del uso del suelo y el modelo de elevación digital, posteriormente se seleccionó la herramienta run transition sub-model, para aceptar la interacción de dichas variables; el valor mínimo de la interacción éste debe ser de un 80%.

Obtenido el valor mínimo de la interacción, se procedió a seleccionar el modulo Change prediction, el objetivo de éste es realizar un predicción de los cambios del uso del suelo. En éste se escribe el año al que se proyectará el cambio (2015-2020 y 20025), posteriormente se selecciona la herramienta Change allocation y se activa la herramienta de la interacción de las carretera y cambios en la infraestructura y se selecciona el comando Run-model y de esta forma se obtiene la proyección del uso del suelo.

4.8 Percepción de la tasa de recarga para los años 2015-2020-2025

Obtenida la proyección del uso del suelo, el siguiente paso fue proyectar la tasa de recarga, el objetivo es ver la interacción de la mancha urbana y el crecimiento en la tasa de recarga. Para hacer la proyección de la recarga se asume que para estos años se tendrá una precipitación y evapotranspiración constante, ya que los valores obtenidos de los años en análisis estas no cambias drásticamente. Posteriormente se retomaron los mapas de la proyección del uso del suelo.

Por otro lado, se estimó el escurrimiento para los años de proyección (2015, 2020 y 2025) para ello, se realizaron los mapas de uso del suelo, posteriormente se realizaron mapas de permeabilidad, por lo que se retomó la tabla que propone Benítez *et al.*, (1980) y posteriormente se retomo la metodología que estipula la norma para medir el escurrimiento natural de la cuenca para cada año de proyección. Obtenido los mapas, se procedió a determinas la posible tasa de recarga para los años 2015, 2020 y 2025, para ello se hizo un macromodelo en el que se introdujo la expresión 4.6 y de esta forma se obtuvo un posible mapa de proyección de recarga para el 2015-2020 y 2025.

4.9 Abastecimiento de agua potable y crecimiento urbano

4.9.1 Crecimiento urbano y consumo de agua potable en 1985-1996 y 2009

El crecimiento urbano es un factor que se encuentra íntimamente ligado con el consumo de agua potable, para este apartado se consideró en número de la población de acuerdo a las estadísticas de la población del Consejo Nacional de Proyecciones (CONAPO; 2011), para estimar la cantidad de agua que ha consumido cada uno de los 19 municipios que se encuentran totalmente dentro de la cuenca.

La determinación del consumo de agua que han tenido los municipios se hará con un dotación por habitante de 200 litros por habitante al día, dotación que establece al Organismo Agua y Saneamiento de Toluca. Cabe mencionar, únicamente se hará la estimación para los municipios que se encuentran totalmente en la cuenca porque son los que se puede cuantificar el agua de consumo de la cuenca, ya que el resto de los municipios se encuentran parcialmente en la cuenca. Los resultados se pueden observar en el siguiente capítulo.

4.9.2 Perspectiva del crecimiento urbano y del consumo de agua potable en el 2015-2020 y 2025

Para hacer la estimación de la perspectiva de agua potable que se pueda consumir del acuífero en el 2015, 2020 y 2025, se retomaran las estadísticas de la proyección de la población del Consejo Nacional de Proyecciones (CONAPO; 2011), esta perspectiva se realizara para los 19 municipios que se encuentran totalmente dentro de la cuenca y el resto de los municipios que se encuentran parcialmente dentro de la cuenca no se consideraran para hacer la proyección del consumo.

La proyección del consumo de agua en los municipios se realizó con una dotación de 250 litros por habitante al día, dotación establecida por el Organismo de Agua y Saneamiento de Toluca. Los resultados se pueden observar en el siguiente capítulo.

Capítulo V

Evaluación de la recarga en el acuífero del valle de Toluca.

5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del presente trabajo de investigación, éste se divide en varios apartados, en el primero se analiza el Modelo Digital de Elevación y posteriormente se describen los resultados obtenidos de la información hidroclimatológica, en el apartado cuatro y cinco se expone los resultados de la estimación de la recarga de 1985-1996 y 2009, evaluada bajo las dos metodologías (método tradicional y el método hidrometeorológico), también se muestran los resultados de la precipitación, el escurrimiento y la evapotranspiración real, estimados para ambas metodologías. En los siguientes apartados se presentan los resultados de la previsión del cambio del uso del suelo y los resultados de la posible tasa de recarga para los años 2015-2020 y 2025 y finalmente se hace una perspectiva del crecimiento urbano y el consumo de agua potable en los años de estudio y los proyectados.

5.2 Análisis del Modelo de Elevación Digital (DEM)

El modelo es uno de los componentes primordiales para conocer y delimitar la cuenca de estudio. Ésta se encuentra limitada por elevaciones que oscilan entre los 2500 y los 4600 metros sobre el nivel del mar, siendo las zonas de mayor elevación la Sierras de las cruces, y los volcanes Nevado de Toluca y Guadadupana, mientras que las zonas de menor elevación corresponden al valle de la cuenca, zona en la que se encuentra establecida la ciudad de Toluca. En la figura 5.1 se puede apreciar, las zonas de color rojo corresponden a las zonas con mayor elevación y la parte de color azul incumbe al valle de la cuenca.

5.3 Interpretación de la información hidroclimatológica

5.3.1 Estaciones climatológicas

Dentro del límite de la cuenca hay 33 estaciones meteorológicas, de este total, se eliminaron las estaciones que no tenían datos completos para los periodos de estudio. Del tratamiento y comparación de la base de datos de la tesis de Vilchis-Francés (2007), se seleccionaron 17 estaciones, de las cuales 12 están dentro de la zona de estudio y 5 se encuentran fuera de la periferia del límite de la cuenca. La distribución de las estaciones se puede apreciar en la figura 5.2

5.3.2 Análisis de la serie de datos faltantes de la base de datos de precipitación y temperatura

Para poder completar la serie de datos fue necesario depurar los datos de la base de datos, en el inciso *a* de la figura 5.3 se puede apreciar la ausencia de datos, cabe mencionar, en la figura se muestra el análisis para una estación, pero el mismo procedimiento se realizó para las 17 estaciones climatológicas, posteriormente en el inciso *b* se puede apreciar los datos completados; la línea azul representa la grafica de los datos depurados y la línea roja corresponde a los datos completados y finalmente en el inciso *c* se muestra la gráficamente la precipitación de forma mensual.

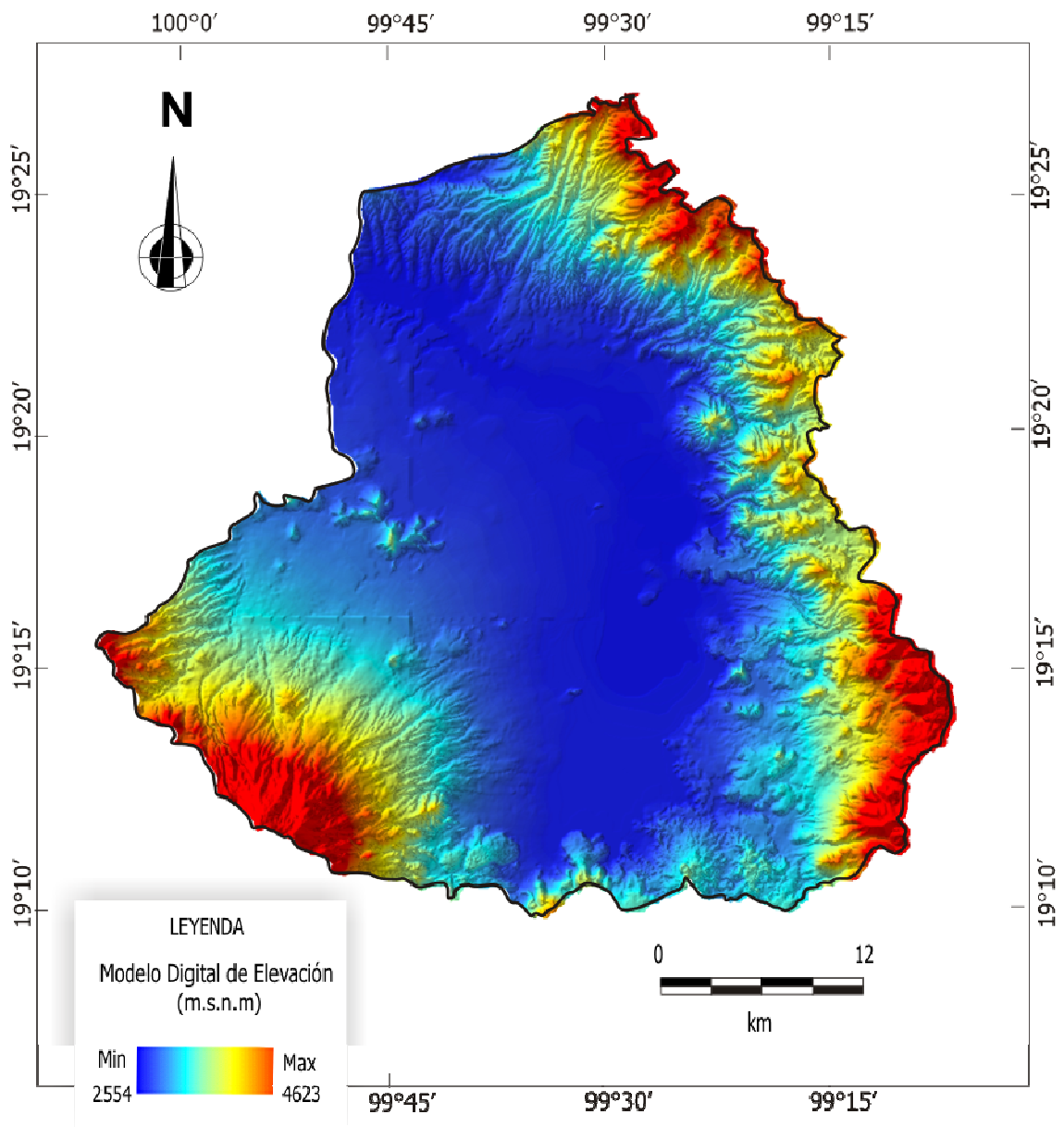


Figura 5.1 Modelo Digital de Elevación (MED) correspondiente a la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar que la cuenca se encuentra limitada al sur por el volcán Nevado de Toluca, al este por la Sierra de las Cruces y al noreste por el volcán Guadalupeana. Fuente elaboración propia.

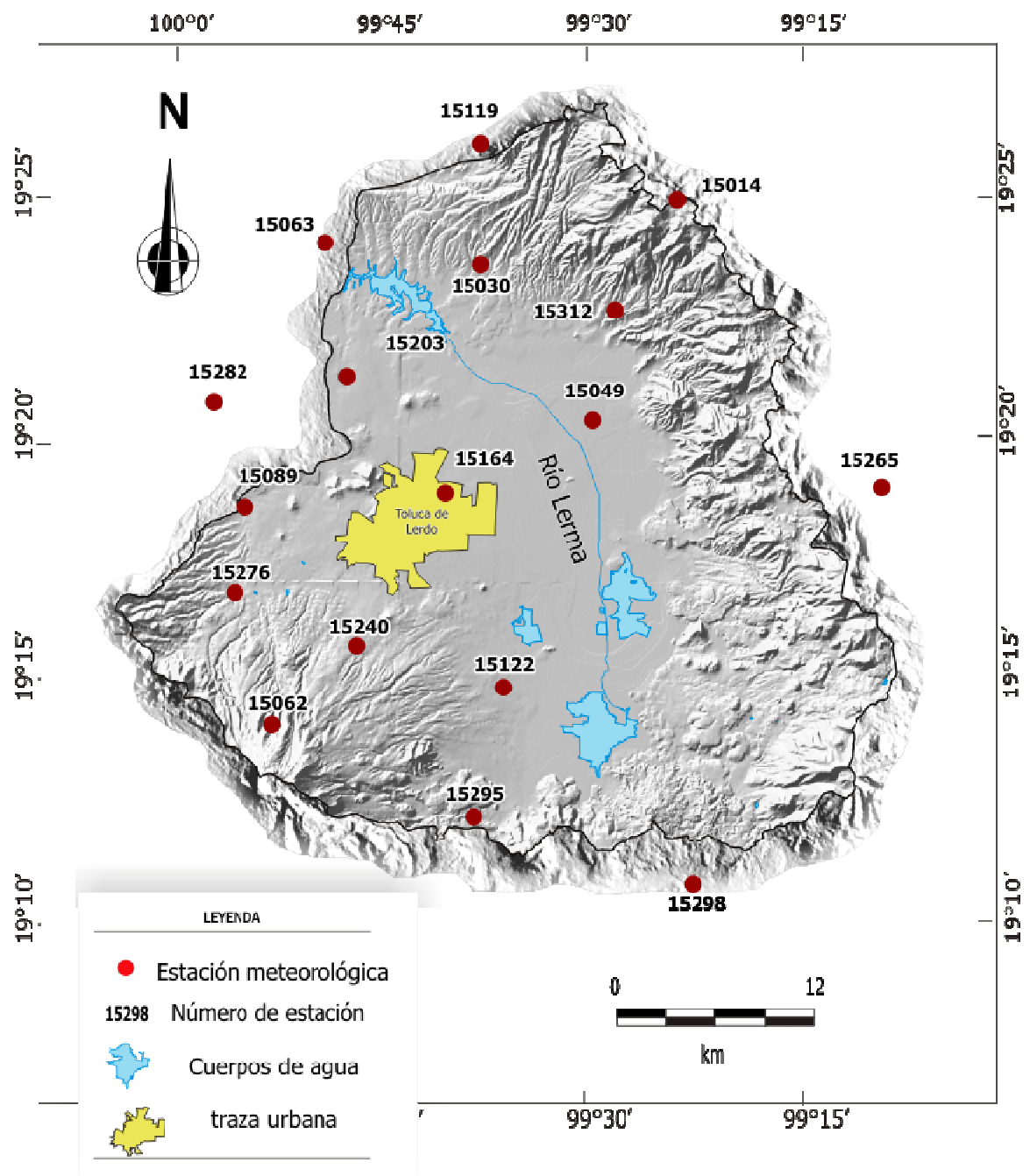


Figura 5.2 Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar los principales cuerpos de agua, conectados por el río Lerma, así como la traza urbana. Fuente elaboración propia.

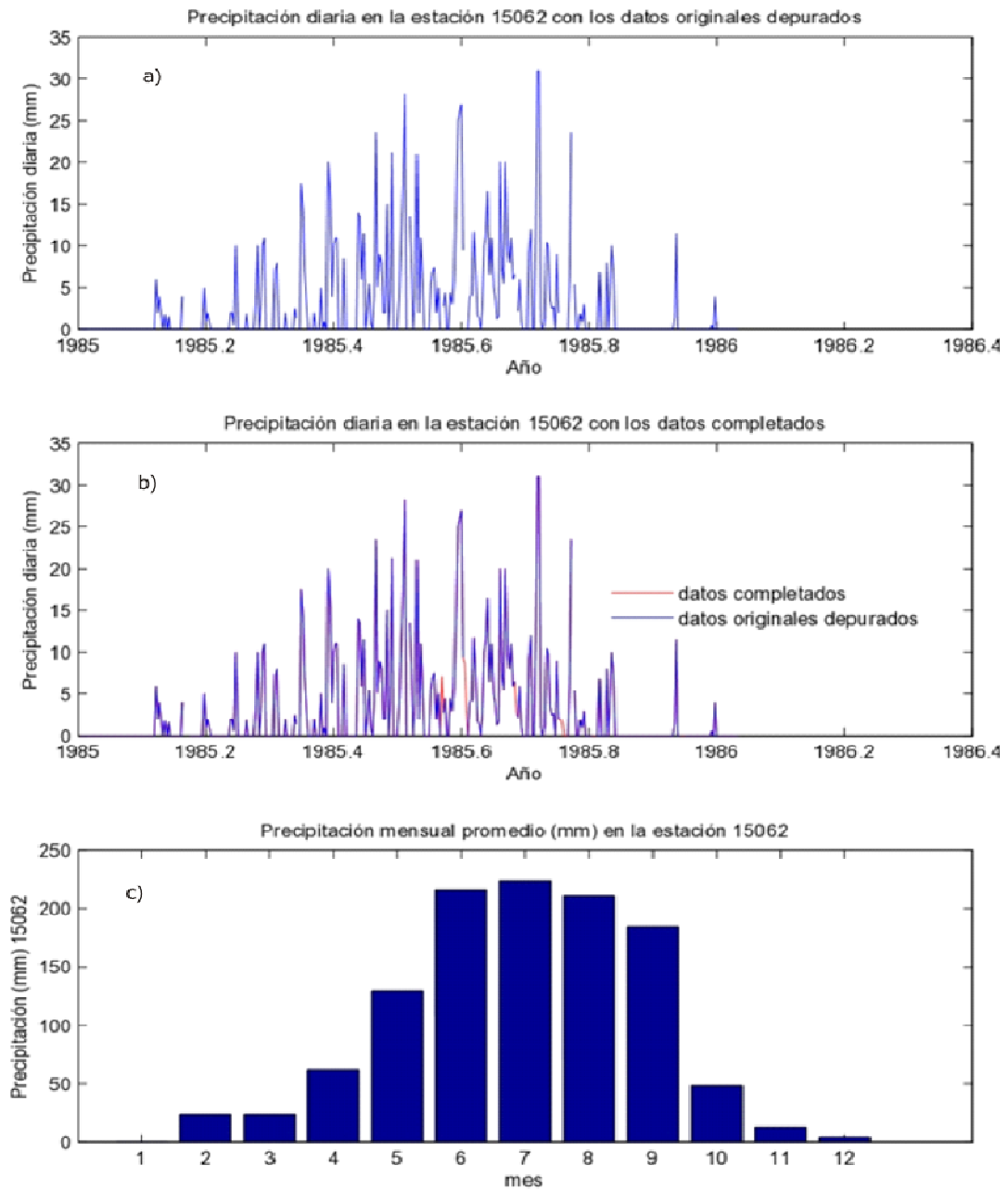


Figura 5.3 Proceso para completar los valores faltantes de la serie de datos de la precipitación de una estación meteorológica. En **a)** se presentan los datos depurados de la precipitación, en **b)** los datos depurados y completados; con los que se obtuvieron los promedios de precipitación mensual y en **c)** se puede apreciar los valores promedios de la precipitación por mes. Fuente elaboración propia.

5.4 Recarga estimada mediante el balance hídrico tradicional

5.4.1 Precipitación promedio estimada mediante métodos empíricos

Tal y como se mencionó en el capítulo anterior, este parámetro se estimó por distintas metodologías. En el método de media aritmética los resultados se realizaron de forma mensual para las 17 estaciones.

De manera general, las precipitaciones inician en el mes de abril y terminan en el mes de octubre, siendo estas más intensas en los meses de junio, julio y agosto; en la figura 5.4 se puede apreciar que la precipitación se distribuye de manera uniforme para los años de estudio. Por otro lado, en la tabla 5.1 se muestran los valores obtenidos de la aplicación de la media aritmética. En la figura 5.5 se puede apreciar la distribución de la precipitación de acuerdo a cada estación, en esta grafica también se puede apreciar que en el año de 1996 la precipitación disminuyó con respecto a los demás años de estudio y el año que más llovió fue el 2009.

Con respecto a la precipitación estimada mediante polígonos de Thiessen, los resultados se muestran en la figura 5.6. En esta figura se señalan el área de influencia de cada polígono con respecto a cada estación meteorológica. En la figura también se puede apreciar que la precipitación cae con más intensidad en las zonas con mayor elevación (Sierra de las Cruces y en los volcanes Nevado de Toluca y Guadalupeana)

5.4.2 Escurrimiento natural de la cuenca estimado mediante el método de la Norma Oficial Mexicana

Como resultado del procedimiento que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000) se tiene un uso de suelo distribuido de forma regular con poco crecimiento urbano y con un área aproximada de 980.3 km^2 cubierto de bosque. En la figura 5.7 se puede apreciar la distribución del uso del suelo; mapa retomado de la CONABIO (1996).

Con respecto al procedimiento realizado para obtener el escurrimiento natural, se tiene un escurrimiento natural de 217.7 mm para 1985, mientras que para 1996 éste fue de 211.5 mm y finalmente, para el 2009 fluctuó en 265.1 mm , en la tabla 5.2 y 5.3 se pueden apreciar los resultados y las variables con las que se estimó este parámetro. Es importante mencionar, la información de la CONABIO fue elaborada aproximadamente en el año de 1985, por lo que no refleja los cambios en uso del suelo, específicamente del crecimiento urbano y la deforestación.

5.4.3 Análisis de la estimación empírica de la evapotranspiración real

De acuerdo a los resultados obtenidos de la fórmula empírica de Turc en el año de 1985 hubo una ETR de 823.4 mm , mientras que para 1996 esta fue de 806 mm y finalmente en el 2009 incrementó a 941.3 mm . Por lo anterior y como ya se mencionó con anterioridad los valores de ETR sumados a los valores del escurrimiento exceden los valores de la precipitación, por lo que fue necesario realizar el ajuste a la fórmula empírica de Turc.

Del ajuste a la fórmula con la metodología que propone Maderey *et al.*, (1995), se tiene una precipitación que entra a la cuenca de: 765 mm en 1985, para 1996 ésta fue de 742 mm y para el 2009 la ETR osciló en 785 mm . Obtenida la precipitación que entra a la cuenca se procedió a estimar la evapotranspiración real con el ajuste a la fórmula de Turc; obteniendo los siguientes resultados, para 1985 la ETR osciló en 667.7 mm , para 1996 ésta fue de 639.7 mm y finalmente en el 2009 fluctuó en 713.3 mm . En las tablas 5.4 y 5.5 se pueden observar los parámetros y los resultados para la estimación.

5.4.4 Evaluación de la recarga mediante el método tradicional

Este método consistió en cuantificar la recarga mediante una base de datos históricas para los años en análisis (1985-1996- 2009). Para realizar la estimación se procesó la expresión (4.6) donde se estimó la precipitación promedio, el escurrimiento y la evapotranspiración real, éstas estimadas mediante fórmulas empíricas.

Por lo tanto se obtuvieron los siguientes resultados; con el ajuste a la fórmula de Turc en 1985 se obtuvo un valor de recarga de 310.9 Hm^3 equivalente al 16% del agua precipitada, para 1996 ésta fluctuó en 224.1 Hm^3 , lo que es lo mismo, se recargó el 11.9% de la precipitación y finalmente en el 2009 el valor osciló en 359.1 Hm^3 , lo que equivale al 15.2 % del agua de lluvia. En la tabla 5.6 se pueden observar los valores antes descritos y en la misma tabla se puede apreciar que los valores de recarga estimados con la evapotranspiración real sin el ajuste a la fórmula de Turc.

Tabla 5.1 Precipitación promedio anual (mm) en la cuenca del valle de Toluca, estimada por métodos empíricos para 1985, 1996 y 2009

| Estación | 1985 | 1996 | 2009 |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|
| 15014 | 909.8 | 1273 | 2149.4 |
| 15030 | 864.3 | 762.3 | 1044.5 |
| 15049 | 1096.4 | 1541.4 | 1576.2 |
| 15057 | 915.0 | 986.6 | 1338.1 |
| 15062 | 1139.0 | 1127.9 | 1385.6 |
| 15063 | 907.7 | 561.8 | 1385.6 |
| 15089 | 664.6 | 784.6 | 792.4 |
| 15119 | 922.6 | 860.1 | 806.8 |
| 15122 | 758.1 | 627.3 | 587.1 |
| 15264 | 647.2 | 627.3 | 587.1 |
| 15203 | 715.9 | 714.6 | 863.7 |
| 15240 | 872.2 | 898.4 | 1062.9 |
| 15265 | 1123.6 | 820.5 | 738.1 |
| 15276 | 838.1 | 689.3 | 1650.1 |
| 15282 | 847.7 | 804.5 | 810.8 |
| 15295 | 1044.3 | 1082.2 | 1339.5 |
| 15298 | 1395.7 | 1128.5 | 1412.6 |
| 15312 | 870.0 | 834.9 | 994.1 |
| promedio | 918.4 | 892.1 | 1118.0 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.2 Cálculo de *K* para determinar el escurrimiento natural en el acuífero del Valle de Toluca mediante un promedio ponderado en función del tipo de suelo.

| Tipos de cubierta vegetal | <i>K</i> | Área | |
|-------------------------------|----------|------------------------|------------|
| | | <i>km</i> ² | % |
| Agricultura de temporal | 0.28 | 823.2 | 7.4 |
| Pastizal con menos del 50% | 0.30 | 72.1 | 8.1 |
| Zonas urbanas | 0.32 | 240.4 | 11.4 |
| Bosque cubierto del 50 al 75% | 0.22 | 980.3 | 73.1 |
| Suma total | | 2116 | 100 |

Fuente: elaboración propia con datos de la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000).

Tabla 5.3 Escurrimiento natural de la cuenca estimado mediante la metodología que establece la Norma Oficial Mexicana

| Periodos de estudio | Área de la cuenca <i>Km</i> ² | Precipitación <i>mm</i> | Ce | Escurrimiento <i>mm</i> |
|---------------------|---|----------------------------|-------|----------------------------|
| 1985 | | 918.4 | 0.144 | 217.7 |
| 1996 | 2116 | 892.1 | 0.141 | 211.5 |
| 2009 | | 1118 | 0.151 | 265.1 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.4 Parámetros utilizados para realizar el ajuste a la fórmula de Turc de acuerdo a la metodología que establece Maderey et al., (1995)

| Región hidrológica | Años de estudio | Temperatura media (°C) | Precipitación media (mm) | Evapotranspiración real de acuerdo con Turc (mm) | Escorrentamiento natural de la cuenca (mm) |
|----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---|---|
| Cuenca del valle de Toluca | 1985 | 22.31 | 918.4 | 823.24 | 217.7 |
| | 1996 | 23.71 | 892.1 | 806 | 211.5 |
| | 2009 | 23.1 | 1118 | 941.3 | 265.1 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.5 Valores de evapotranspiración real para 1985, 1996 y 2009 obtenidos del procesamiento de la metodología de Maderey et al., (1995)

| Región hidrológica | años de estudio | Precipitación de acuerdo a la clasificación climática de Köppen (mm) | Factor Ajuste | Evapotranspiración real según Turc, ajustada (mm) |
|----------------------------|-----------------|---|---------------|--|
| Cuenca del valle de Toluca | 1985 | 765 | 0.87 | 667.7 |
| | 1996 | 742 | 0.84 | 639.7 |
| | 2009 | 785 | 0.91 | 713.3 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.6 Valores de recarga para la cuenca del Valle de Toluca para los años 1985, 1996 y 2009 estimada con la evapotranspiración real con y sin el ajuste a la éste parámetro

| Región hidrológica | Años de estudio | Recarga estimada sin el ajuste a la fórmula de Turc <i>mm/año</i> | Recarga estimada con ajuste a la fórmula de Turc <i>mm/año</i> | Recarga estimada mediante el ajuste a la fórmula de Turc <i>Hm^{3/año}</i> |
|----------------------------|-----------------|--|---|---|
| Cuenca del valle de Toluca | 1985 | -226.8 | 146.9 | 310.9 |
| | 1996 | -125.4 | 105.9 | 224.1 |
| | 2009 | 54.3 | 167.7 | 359.1 |

Fuente: elaboración propia

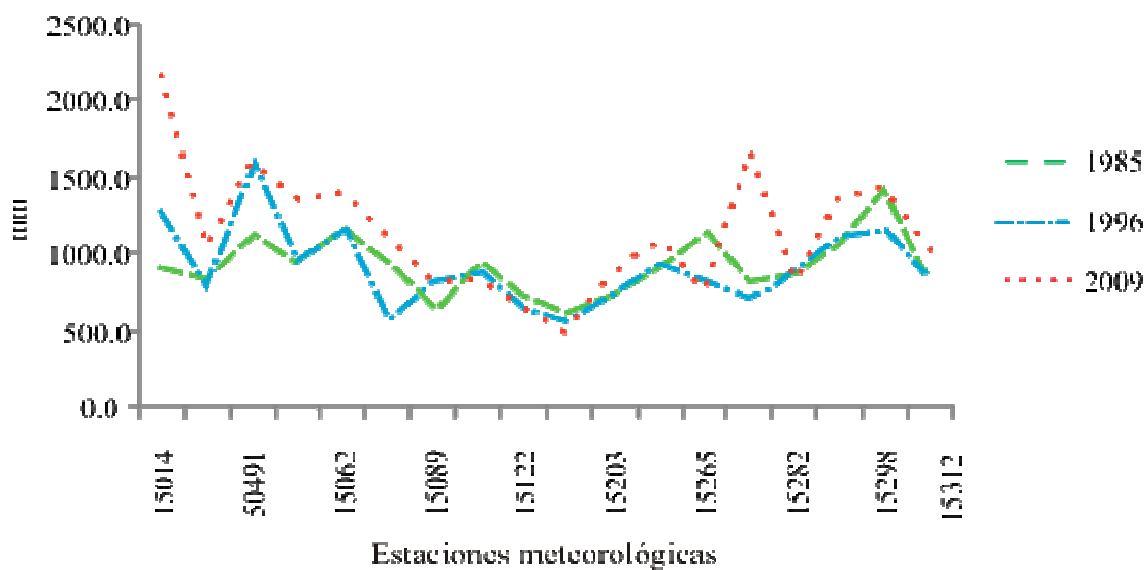


Figura 5.4 Distribución promedio mensual de la precipitación de las estaciones meteorológicas que se encuentran dentro y fuera de la cuenca del Valle de Toluca. La distribución se hace para cada año en estudio. Fuente elaboración propia.

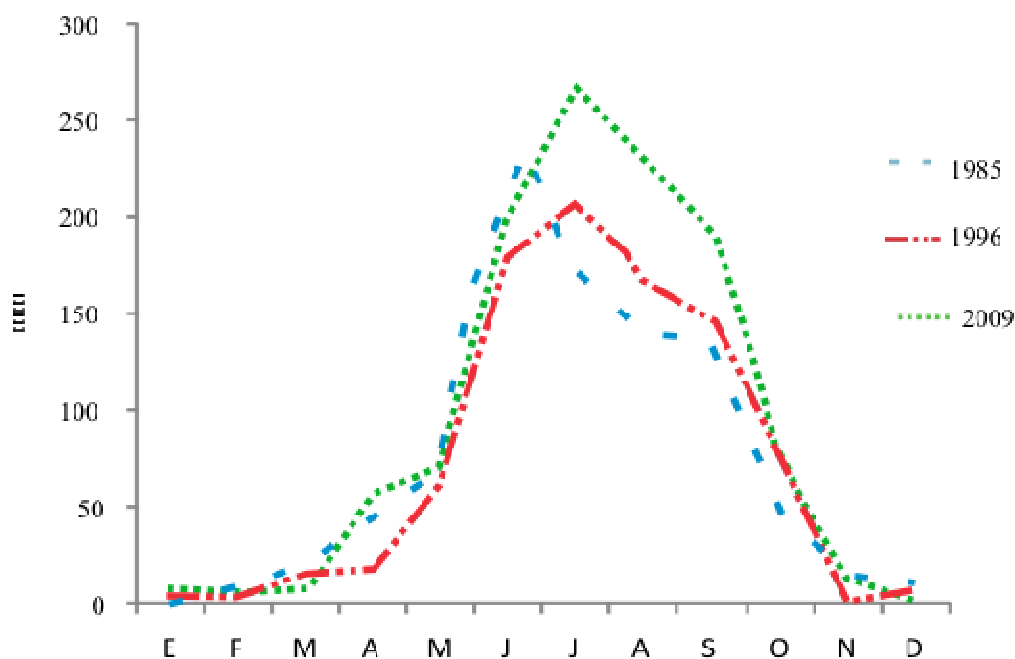


Figura 5.5 Distribución mensual de la precipitación promedio para 1985, 1996 y 2009. Fuente elaboración propia.

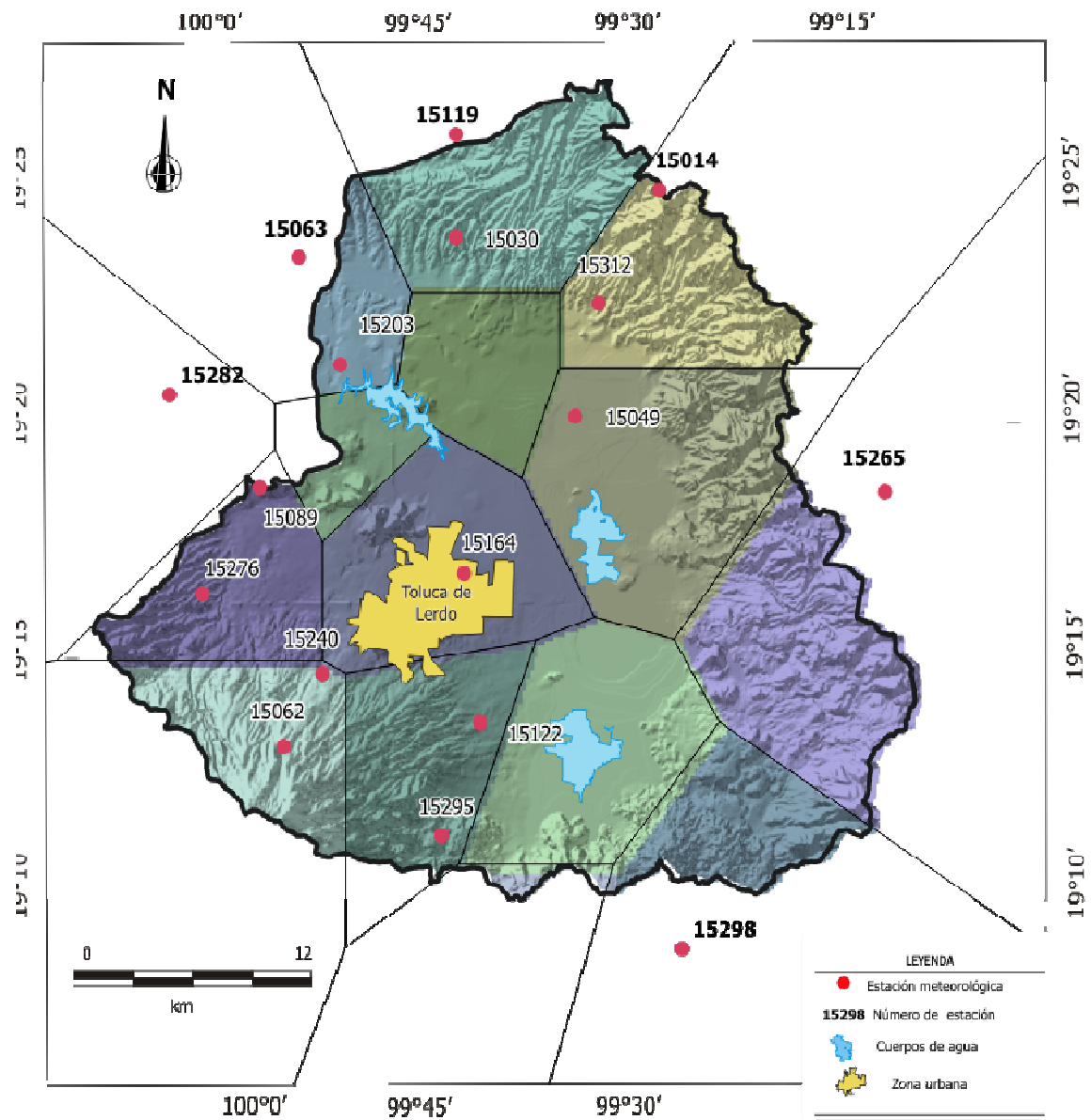


Figura 5.6 Mapa de Polígonos de Thiessen en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar el radio de influencia de cada polígono. Asimismo se pueden apreciar los principales cuerpos de agua y la traza urbana. Fuente Elaboración propia

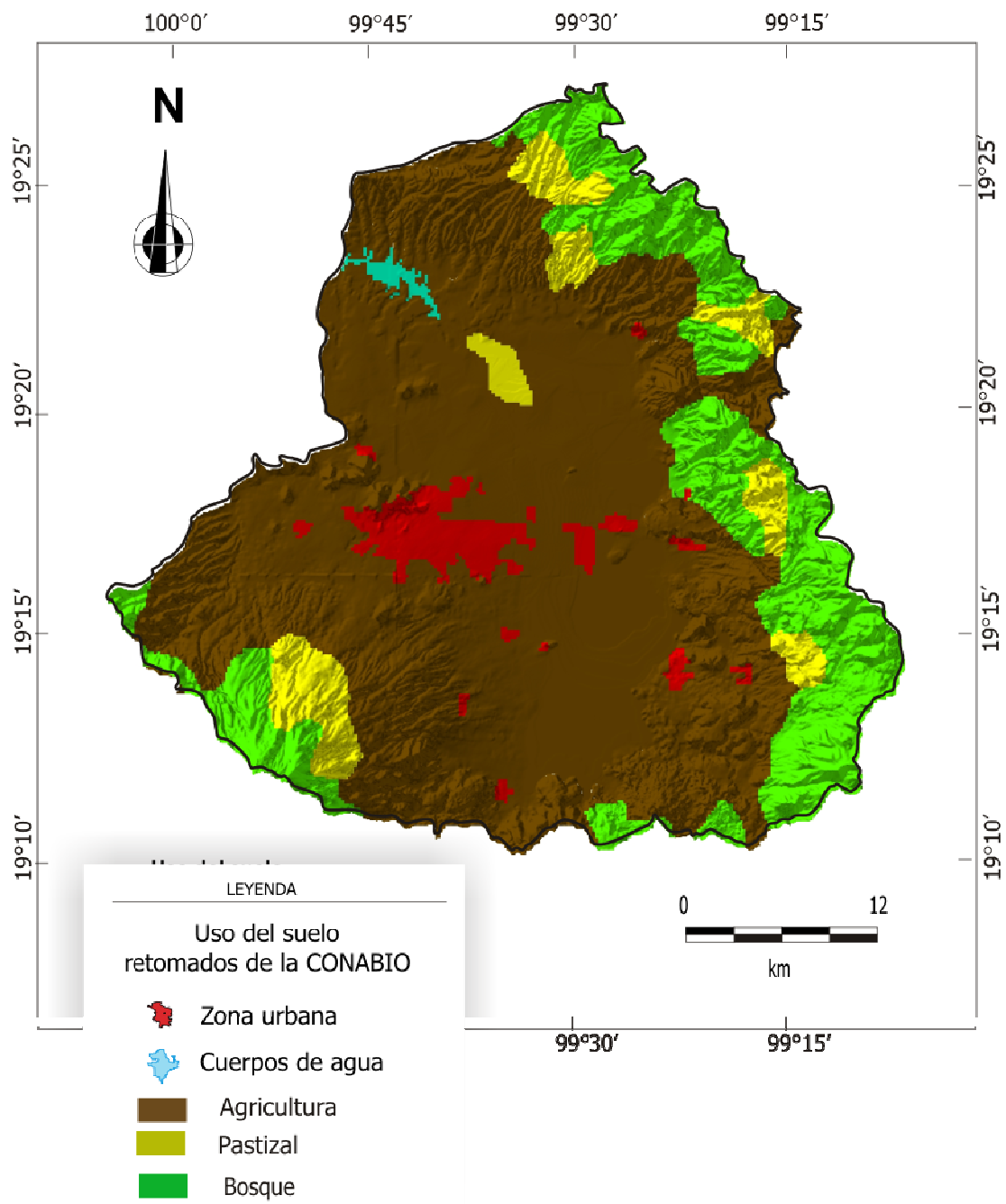


Figura 5.7 Mapa de uso del suelo en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar el área de influencia de cada uso del suelo que predomina en la zona de estudio. Fuente, elaboración propia a partir de la información de la CONABIO (1996)

5.5 Estimación de la recarga a través de un balance hidrometeorológico

5.5.1 Precipitación estimada por el método spline

La precipitación es uno de los parámetro más importantes para estimar la tasa de recarga, la distribución espacial de este parámetro permite vislumbrar las zonas en las que se efectúa con mayor intensidad la precipitación. En las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10 se puede apreciar que ésta ocurre con mayor intensidad en las zonas con mayor elevación.

En estas figuras se puede apreciar la discretización del valor de precipitación, cuya malla de discretización tiene una resolución de 30 x 30 m, dando lugar a una lámina de precipitación para 1985 de 918.4 mm con un volumen promedio anual de 1944.3 Hm^3 , para 1996 la precipitación promedio osciló en 892.1mm con un volumen promedio anual de 1888.4 Hm^3 y finalmente para el 2009 la lamina fue de 1118 mm lo que se traduce a un volumen anual de 2366.5 Hm^3

En comparación de los tres mapas, la precipitación ha variado temporal y espacialmente, en 1985 la mayor tasa de precipitación aconteció con mayor intensidad en la Sierra de las Cruces, para 1996 ésta ocurrió en la zona de los volcanes Nevado de Toluca y Guadalupeana y para el 2009 sucedió en el volcán Nevado de Toluca, es importante mencionar, la precipitación con menor intensidad para los tres años se presentó en el centro del valle de la cuenca.

5.5.2 Escurrimiento natural de la cuenca evaluado a través del uso del suelo

El escurrimiento es un proceso natural que ocurre en la cuenca, este fenómeno depende directamente del uso y la permeabilidad del suelo. La permeabilidad es uno de los componentes que limitan o favorecen la cantidad de agua que se puede infiltrar en un acuífero. En la figura 5.13 se pueden observar la distribución de la permeabilidad en la cuenca. Específicamente en la figura, la zona impermeable corresponde a la zona marcada de color gris claro, la parte semipermeable corresponde al color gris semi-oscuro y el suelo permeable concierne al color gris oscuro.

De manera general, para el 2009 el suelo impermeable ascendió a 290.65 km^2 , el semipermeable disminuyó 165.66 km^2 y el permeable también disminuyó 95 km^2 . Los resultados anteriores están en función de los datos de impermeable, semipermeable y permeable del primer año es estudio (1985). Por otro lado, en la tabla 5.7 se puede apreciar que el suelo impermeable incrementó en el 2009 un 16.5% con respecto a los años anteriores, el suelo semipermeable ha disminuido aproximadamente un 3 % por año y el suelo permeable, también ha disminuido un 2% aproximadamente por cada año de estudio.

Por otra parte, en 1985 es escurrimiento natural fue de 215 mm , para 1996 éste osciló en 240 mm y finalmente en el 2009 fluctuó en 317 mm . En la tabla 5.8 se puede apreciar el escurrimiento en milímetros y en Hectómetros cúbicos y en las figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se puede observar las zonas de mayor influencia de escurrimiento.

Por otro lado, en las zonas montañosas con vegetación densa el escurrimiento es bajo, mientras en las zonas de cultivo y con poca vegetación éste es moderado y en las zonas urbanas incrementa. Una de las principales ventajas que se tiene al estimar el escurrimiento mediante este software es generar y trabajar con información acorde al uso del suelo de cada año.

a) Análisis de los cambios temporales del uso del suelo para 1985-1996 y 2009

Dentro de la cuenca de Valle de Toluca, los cambios del suelo han sido muy significativos; específicamente, en el año de 1985 el uso del suelo que más predominaba era la agricultura con 732.5 km^2 , el bosque con una extensión de 604.9 km^2 y el pastizal con 513.6 km^2 , cabe mencionar en ese año predominaban cuerpos de agua con una superficie de 113.6 km^2 , mientras el suelo con poca vegetación y la mancha urbano eran los usos con menor presencia. Sin embargo, estos han sido modificados. En 1996 incrementó el suelo con poca vegetación, éste ascendió 303.4 km^2 y la mancha urbana triplicó su crecimiento, mientras tanto el bosque disminuyó 134.5 km^2 , los cuerpos de agua disminuyeron en un 48.7% y la agricultura también disminuyó un 55.7%. En la figura 5.11 se muestra gráficamente el uso del suelo para 1985 y 1996.

Específicamente el bosque redujo porque el suelo con poca vegetación y el pastizal ocuparon parte de la extensión de éste. Por otro lado, la mancha urbana creció en zonas de pastizal, agricultura y suelo con poca vegetación.

Por otra parte en el 2009, la mancha urbana ascendió a 306 km^2 , asimismo, el suelo con poca vegetación creció 228.8 km^2 , y el pastizal incrementó 90.3 km^2 ; por otro lado, el bosque disminuyó un 44.7 %, los cuerpos de agua se redujeron en un 30% y la agricultura también se redujo un 10%. Los cambios antes descritos están en función de la comparación del uso del suelo entre 1996 y el 2009. En la figura 5.12 se pueden constatar dichos cambios. Por otro lado, las principales pérdidas del suelo boscoso, la han ocasionado el suelo desnudo y el pastizal. Finalmente, en el 2009 la mancha urbana incrementó 101.5 km^2 , dicha mancha se expandió 27.4 km^2 sobre el suelo con poca vegetación, ésta creció 16 km^2 en el pastizal y 58.1 km^2 en la agricultura.

En los últimos años han sido muy significativos los cambios de uso de suelo dentro de la zona de estudio. El crecimiento demográfico ha sido el principal fenómeno que ha generado distintos cambios en el uso del suelo de la cuenca. En las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 se puede apreciar la distribución de la mancha urbana para 1985-1996- 2009. En éstos se puede observa que el crecimiento urbano de la ciudad de Toluca se expandió hacia los municipios de: Calimaya, San Mateo Atenco, Metepec, Almoloya de Juárez, Chapultepec, Lerma, Mexicalcingo, Ocoyoacac, Rayón, San Antonio la Isla, Zinacantepec, Temoaya, Jiquipilco, Huixquilucan y Otzolotepec.

De manera general, la deforestación ha sido a consecuencia del crecimiento del pastizal, del suelo desnudo y de las zonas agrícolas principalmente, estos a su vez, han sido factores que han favorecido el crecimiento urbano en la cuenca. Dicha mancha está alterando las condiciones naturales de la zona; afectando principalmente los cuerpos de agua y el desplazamiento de las zonas agrícolas.

5.5.3 Evapotranspiración real estimada mediante imágenes de satélite

La ETR fue estimada tal y como lo describe Wang *et al.*, (2007), con la aplicación de esta metodología se puede obtener una aproximación razonable de la ETR. De acuerdo a los resultados de la metodología, se tiene una lámina de evapotranspiración real de forma discretizada con un valor de 570.2 *mm* para 1985, para 1996 ésta fluctuó en 553.3 *mm* y para el 2009 osciló en 670 *mm*, en las figuras 5.25, 5.26 y 5.27 se puede apreciar la distribución de la ETR.

De manera general la variación espacial de ésta en los tres años de estudio es variado, específicamente en el 2009 incrementó 100 *mm* con respecto al primer años de estudio. Por otro lado, la mayor cantidad evapotranspiración ocurre en las zonas con vegetación densa y en las partes donde se encuentra asentada la mancha urbana la ETR es mínima.

En la siguiente tabla (5.9) se pueden apreciar los resultados obtenidos de la ETR por las distintas metodologías. Los valores obtenidos de la fórmula empírica de Turc son mayores a los obtenidos por la metodología de Wang, por el contrario los valores obtenidos de la metodología de Madery *et al* (1995) los valores son aproximadamente 100 *mm* más que los obtenidos con la metodología de Wang *et al* (2007)

a) Índice de la cubierta vegetal (NDVI)

Para estimar la ETR fue necesario estimar el Índice de Cubierta Vegetal, en la figura 5.20 se puede apreciar que la mayor cantidad de vegetación se encuentra en las zonas montañosas (Sierra de las Cruces y los Volcanes Guadalupeana y Nevado de Toluca) mientras en las zonas con crecimiento urbano existe poca vegetación. En esta figura se puede apreciar que las zonas marcadas de color rojo se encuentra la mayor cantidad de vegetación, la parte verde, corresponde a la zonas con menor vegetación y la zona amarilla corresponde al crecimiento de la vegetación de forma moderada.

b) Estimación de la Radiación solar

En la figura 5.21 se puede observar que la que la mayor incidencia de la radiación solar ocurre en el valle de la cuenca específicamente donde se encuentra la mancha urbana y la menor radiación sucede en las zonas altas que limitan la cuenca. En la parte amarilla, es donde ocurre la mayor cantidad de radiación.

b) Temperatura máxima, mínima y promedio

La estimación de la temperatura se realizó a través del método de proximidad con ajuste de elevación con datos retomados de la base de datos CLICOM. De manera general, la temperatura promedio osciló entre 3 y 15 grados centígrados. En la figura 5.22 se puede observar la distribución de la temperatura media. De manera general, en la parte central de la cuenca ésta incrementa, mientras, en las zona de las Sierra de las Cruces y el los volcanes Guadalupeana y Nevado de Toluca la temperatura es menor. Lo antes descrito se puede observar en las figuras 5.23 y 5.24

5.5.4 Evaluación de la recarga estimada mediante un balance hidrometeorológico

De manera general, la recarga en las últimas 3 décadas ha cambiado, principalmente en el crecimiento de la zona urbana, y en la disminución del bosque. En los mapas de recarga se puede apreciar que la mancha urbana se ha expandido hacia la zona metropolitana de la ciudad, mientras la deforestación se ha incrementado en la Sierra de las creces y el volcán Guadalupeana.

Por otro lado, la recarga ocurre en las faldas del Nevado de Toluca y en parte zonas altas que limitan la cuenca (Sierra de las Cruces y volcán Guadalupeana). En 1985 se recargaron 302.1 Hm^3 lo que equivale a 15 % de la precipitación, mientras tanto en 1996 se recargaron 258.30 Hm^3 lo que corresponde al 13% del total de la precipitación y finalmente en el 2009 se recargaron 335.1 Hm^3 lo que es lo mismo, se recargó el 16% del total del agua precipitada. En las figuras 5.28, 5.29 y 5.30 se puede apreciar las zonas de recarga para los años de estudio.

Con respecto al crecimiento urbano y la deforestación variables de interés en la presente investigación; el primero no altera de manera directa la tasa de recarga por precipitación porque la mayor tasa de recarga ocurre en las partes montañosas del acuífero. Sin embargo, esta variable afecta el incremento del escurrimiento natural. La segunda si impacta en la tasa de recarga, a razón que en las zonas con mayor vegetación y altitud ocurre este fenómeno.

Tabla 5.7 Permeabilidad del suelo en la cuenca del Valle de Toluca en 1985, 1996 y 2009

| Años de estudio | Área de la cuenca <i>Km²</i> | Suelo impermeable <i>Km²</i> | Suelo semi-permeable <i>Km²</i> | Suelo permeable <i>Km²</i> |
|-----------------|--|--|---|--|
| 1985 | | 58.99 | 1243.14 | 814.59 |
| 1996 | 2116.72 | 223.3 | 1118.72 | 774.7 |
| 2009 | | 349.64 | 1047.48 | 719.6 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.8 Esgurrimiento natural de la cuenca, estimado mediante herramientas en el Sistema de Información Geográfica

| Años de estudio | Área de la cuenca | Esgurrimiento natural de la cuenca | | Precipitación | |
|-----------------|-------------------|------------------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
| | | <i>Km²</i> | <i>mm/año</i> | <i>Hm³/año</i> | <i>mm/año</i> |
| 1985 | 2116.72 | 215 | 455 | 918.4 | 1944 |
| 1996 | | 240 | 507.8 | 892.1 | 1888.3 |
| 2009 | | 317 | 670.8 | 1118 | 2366.5 |

Fuete: elaboración propia

Tabla 5.9 Valores de evapotranspiración real, para 1985, 1996 y 2009, estimados con y sin ajuste a la fórmula de Turc y Wang.

| Años en estudio | Evapotranspiración real de acuerdo con Turc | Evapotranspiración con ajuste a la fórmula de Turc | Evapotranspiración con la metodología de Wang <i>et al</i> (2007) |
|-----------------|---|--|---|
| | <i>(mm/año)</i> | <i>(mm/año)</i> | <i>(mm/año)</i> |
| 1985 | 823.24 | 667.7 | 570.2 |
| 1996 | 806 | 639.7 | 553.3 |
| 2009 | 941.3 | 783.3 | 670 |

Fuente: elaboración propia

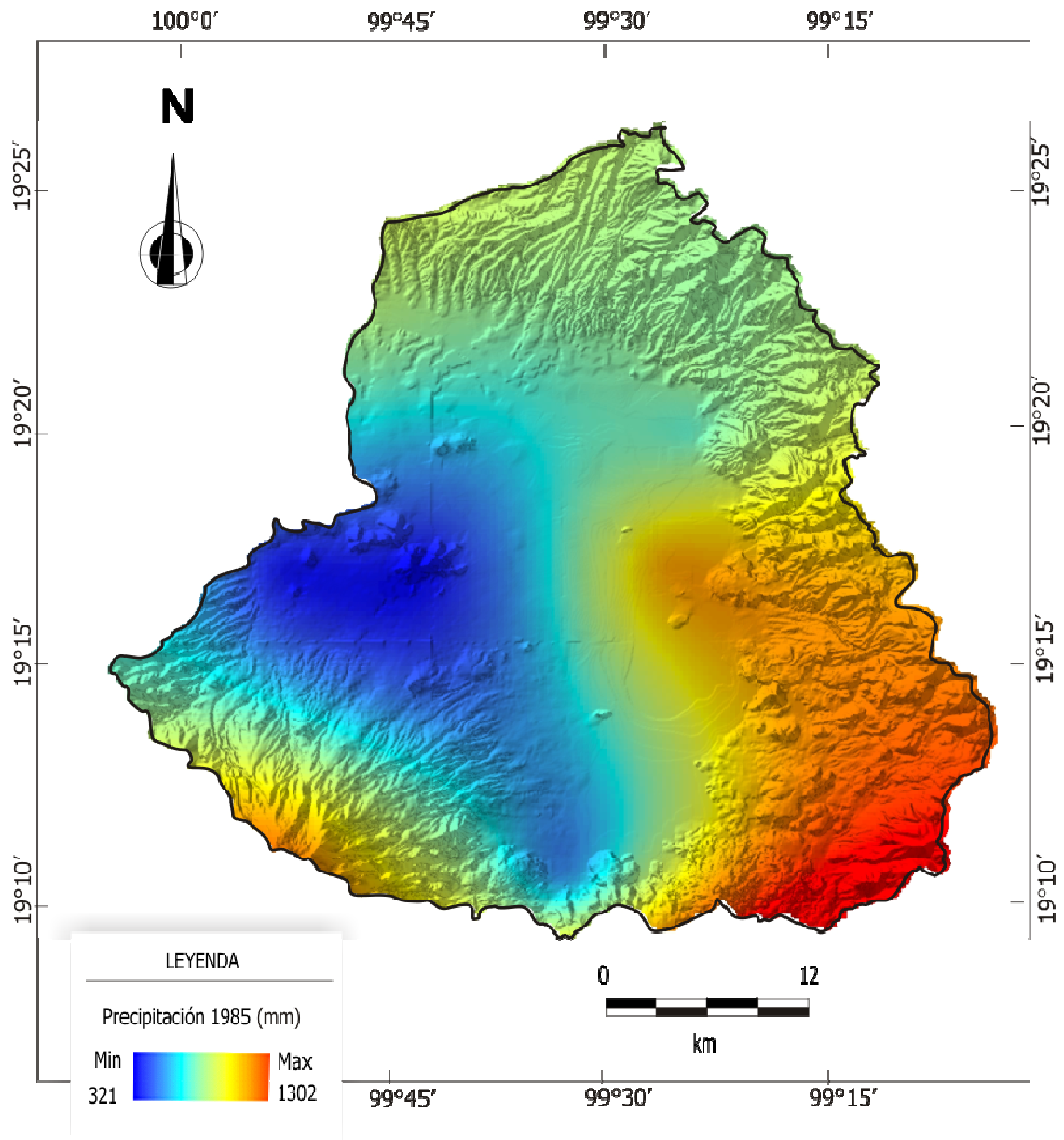


Figura 5.8 Mapa de precipitación promedio anual en la cuenca del Valle de Toluca para el año de 1985, estimado por el método spline. En la figura se puede apreciar que la mayor tasa de precipitación ocurrió en la Sierra de las cruces y en el Nevado de Toluca. Fuente elaboración propia.

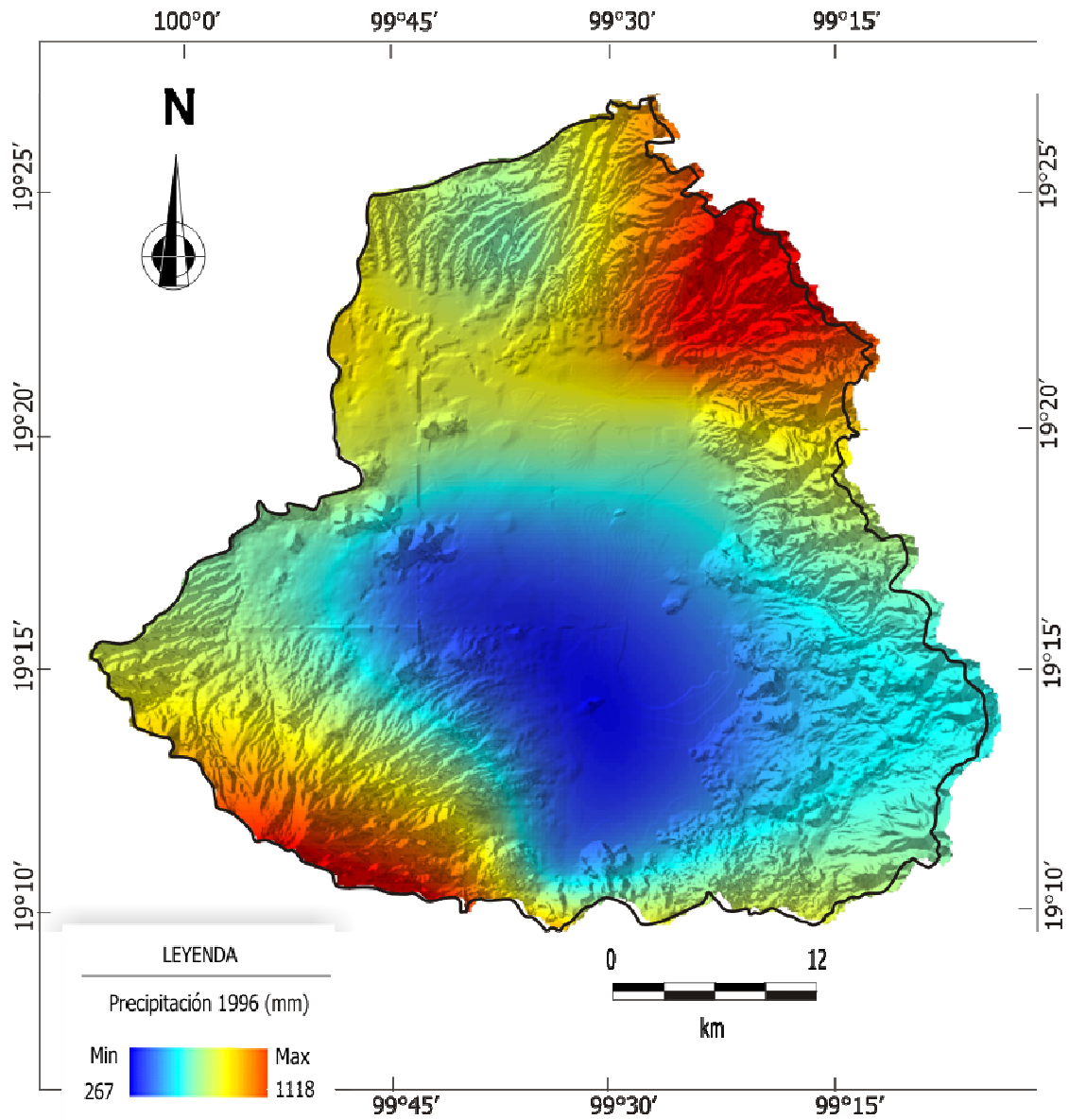


Figura 5.9 Mapa de precipitación promedio anual en la cuenca del Valle de Toluca para el año de 1996; estimada por el método Spline. En la figura, se puede apreciar que la mayor de precipitación ocurrió en los volcanes Nevado de Toluca y Guadalupeana. Fuente elaboración propia.

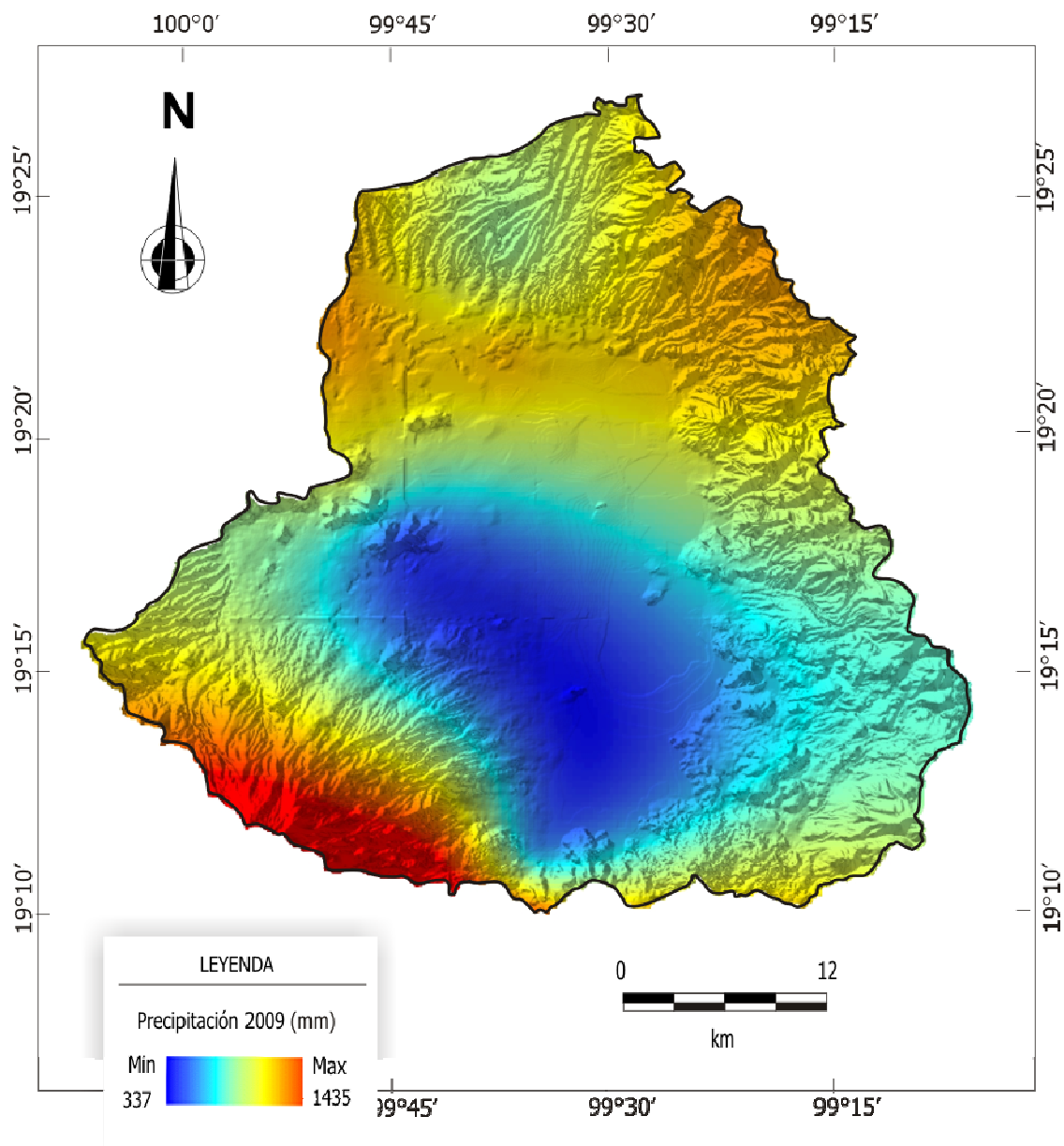


Figura 5.10 Mapa de precipitación promedio anual en la cuenca del Valle de Toluca para el año del 2009, estimada por el método Spline. En la figura, se puede apreciar que la mayor precipitación ocurrió en el volcán Nevado de Toluca. Fuente elaboración propia.

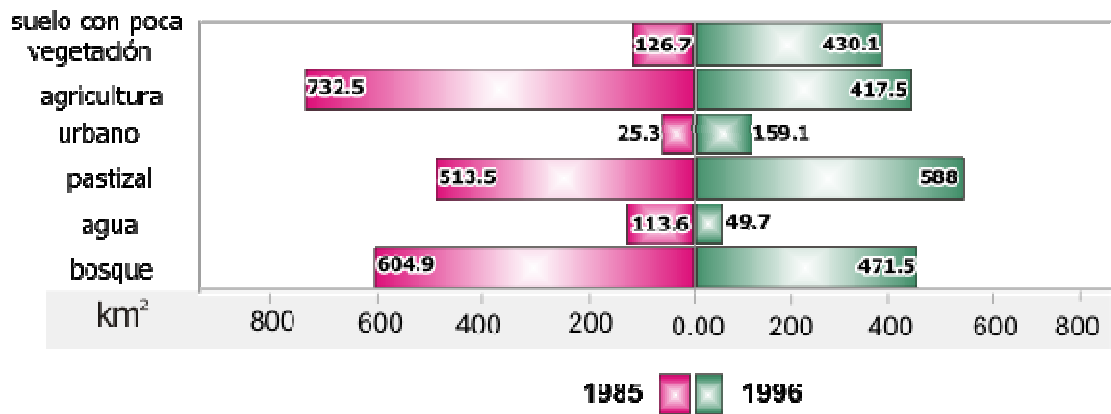


Figura 5.11 Cambios en el uso del suelo en la cuenca del Valle de Toluca para los años 1985-1996. Fuente elaboración propia.

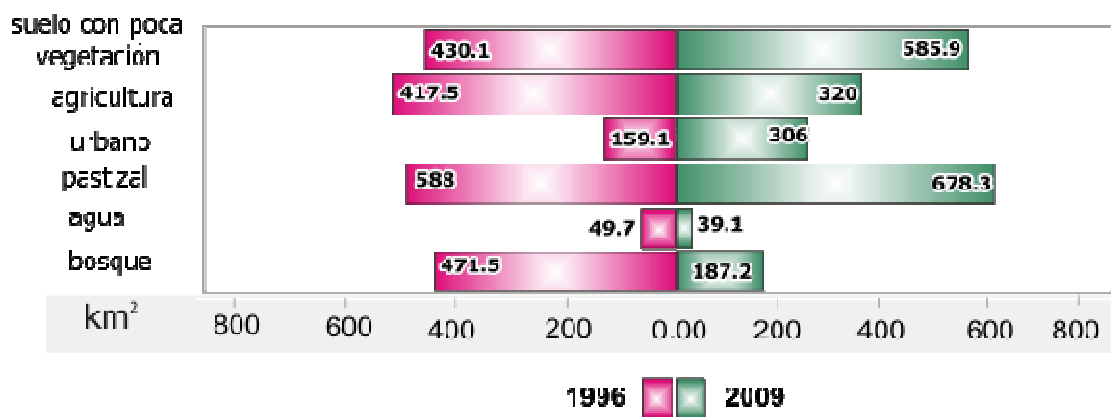


Figura 5.12 Cambios en el uso del suelo en la cuenca del Valle de Toluca para 1996-2009. Fuente elaboración propia.

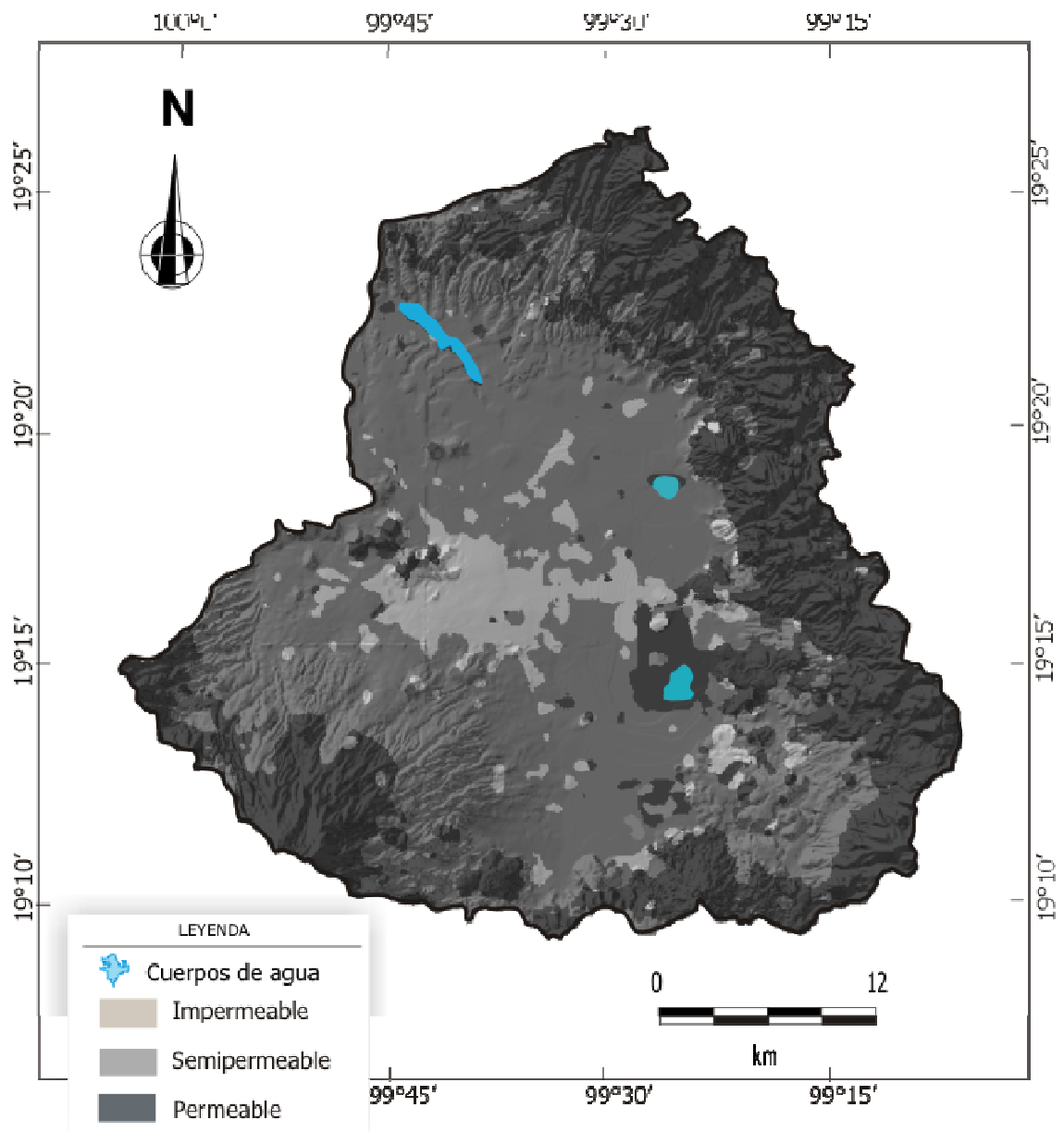


Figura 5.13 Mapa de permeabilidad del suelo para el 2009 en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar la mancha urbana y los principales cuerpos de agua. Fuente elaboración propia

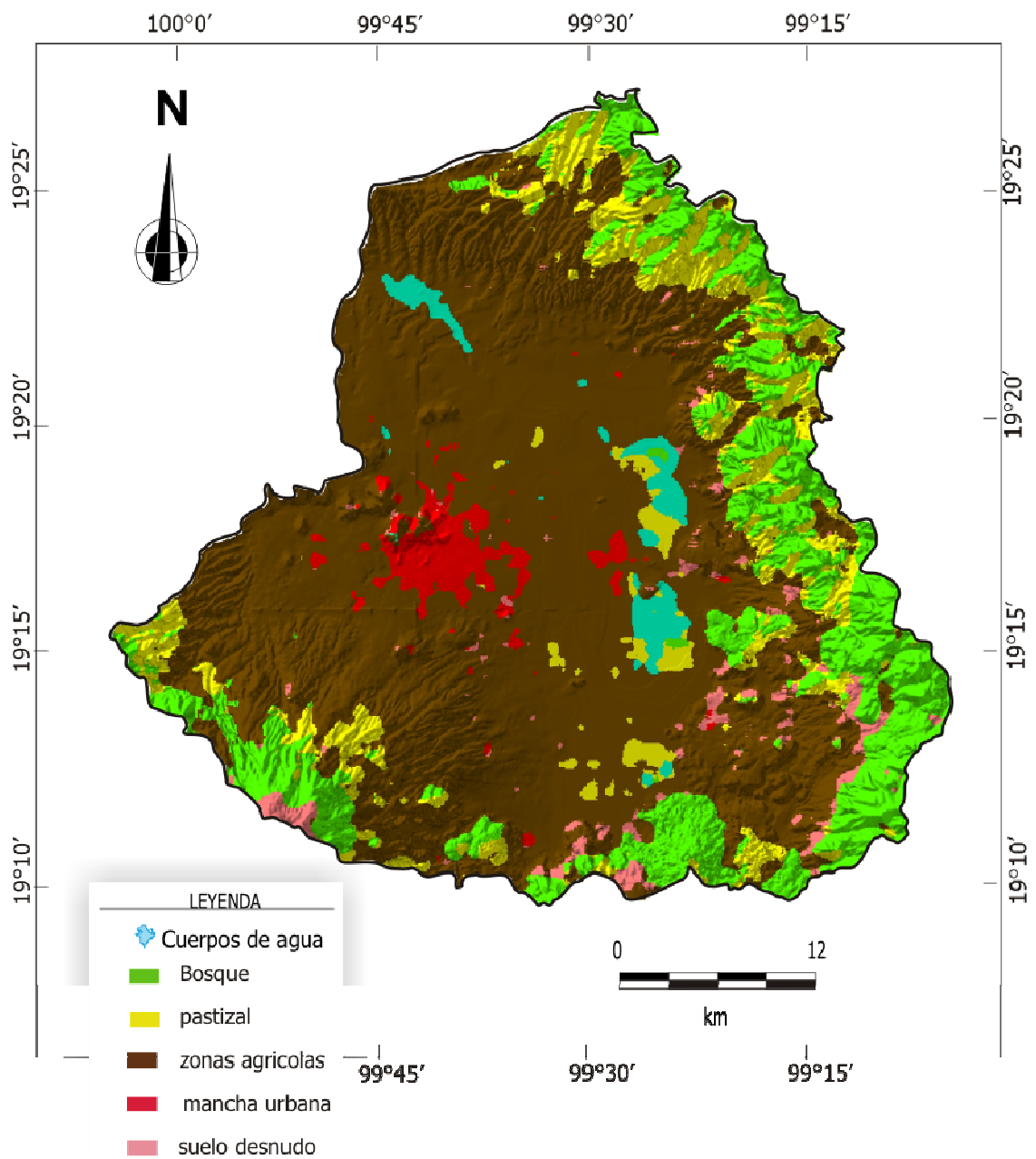


Figura 5.14 Mapa uso del suelo para el año 1985 en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar la distribución del uso del suelo. Fuente elaboración propia, obtenido de la clasificación supervisada.

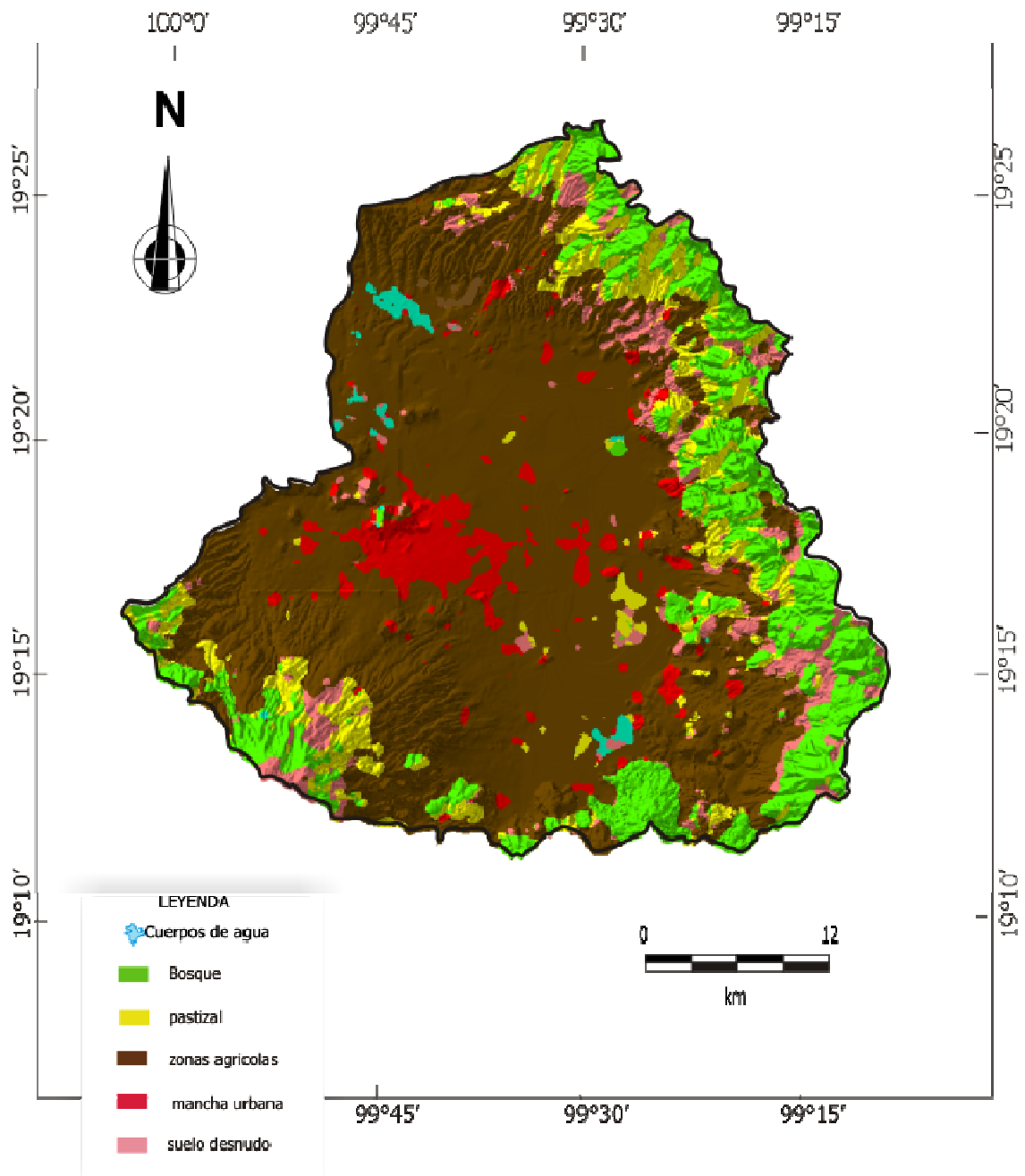


Figura 5.15 Mapa uso del suelo para el año 1996 en la cuenca del Valle de Toluca, En la figura se puede apreciar la distribución del uso del suelo. Fuente elaboración propia, obtenido de la clasificación supervisada.

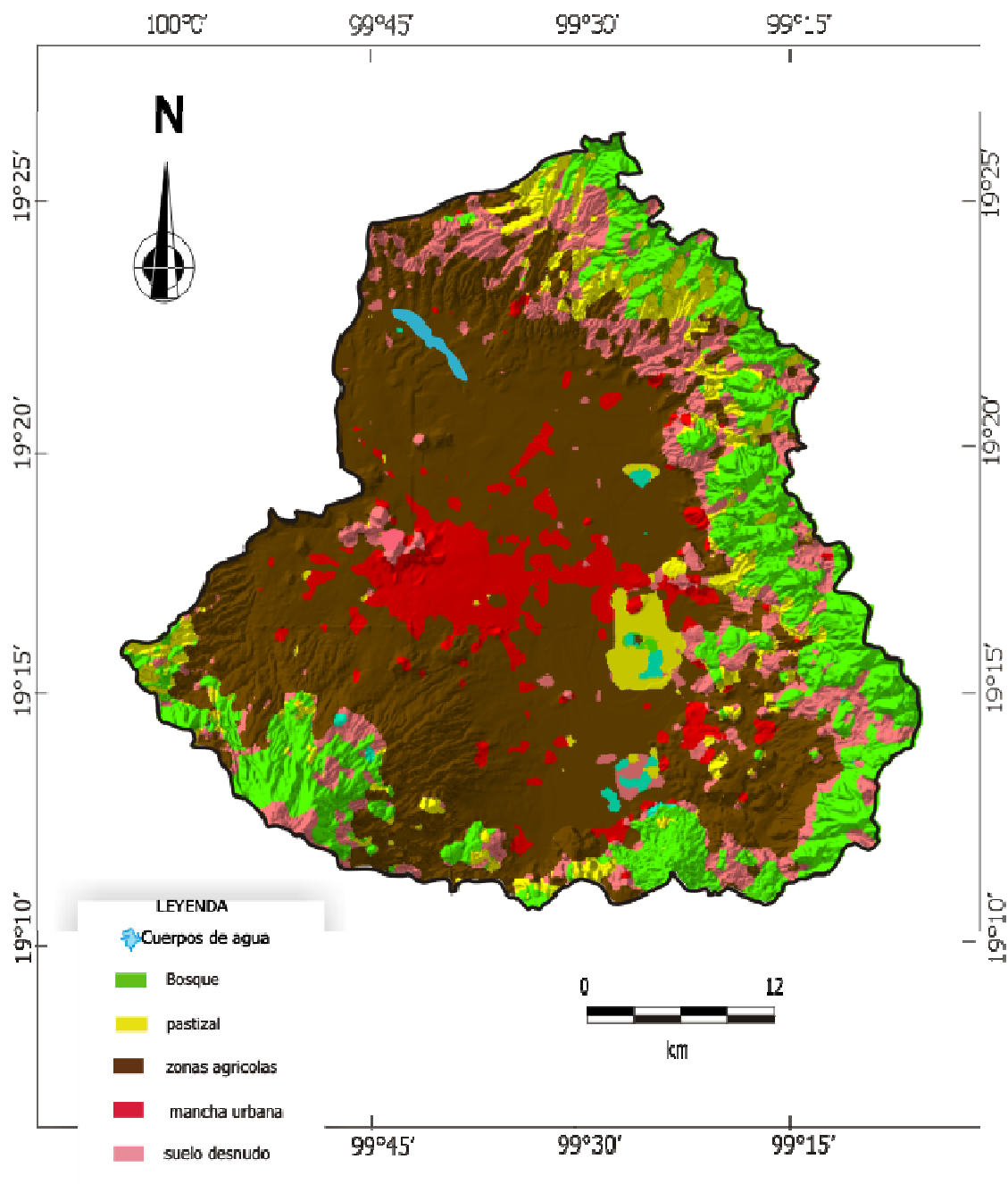


Figura 5.16 Mapa uso del suelo para el año 2009 en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar la distribución del uso del suelo. Fuente elaboración propia, obtenido de la clasificación supervisada.

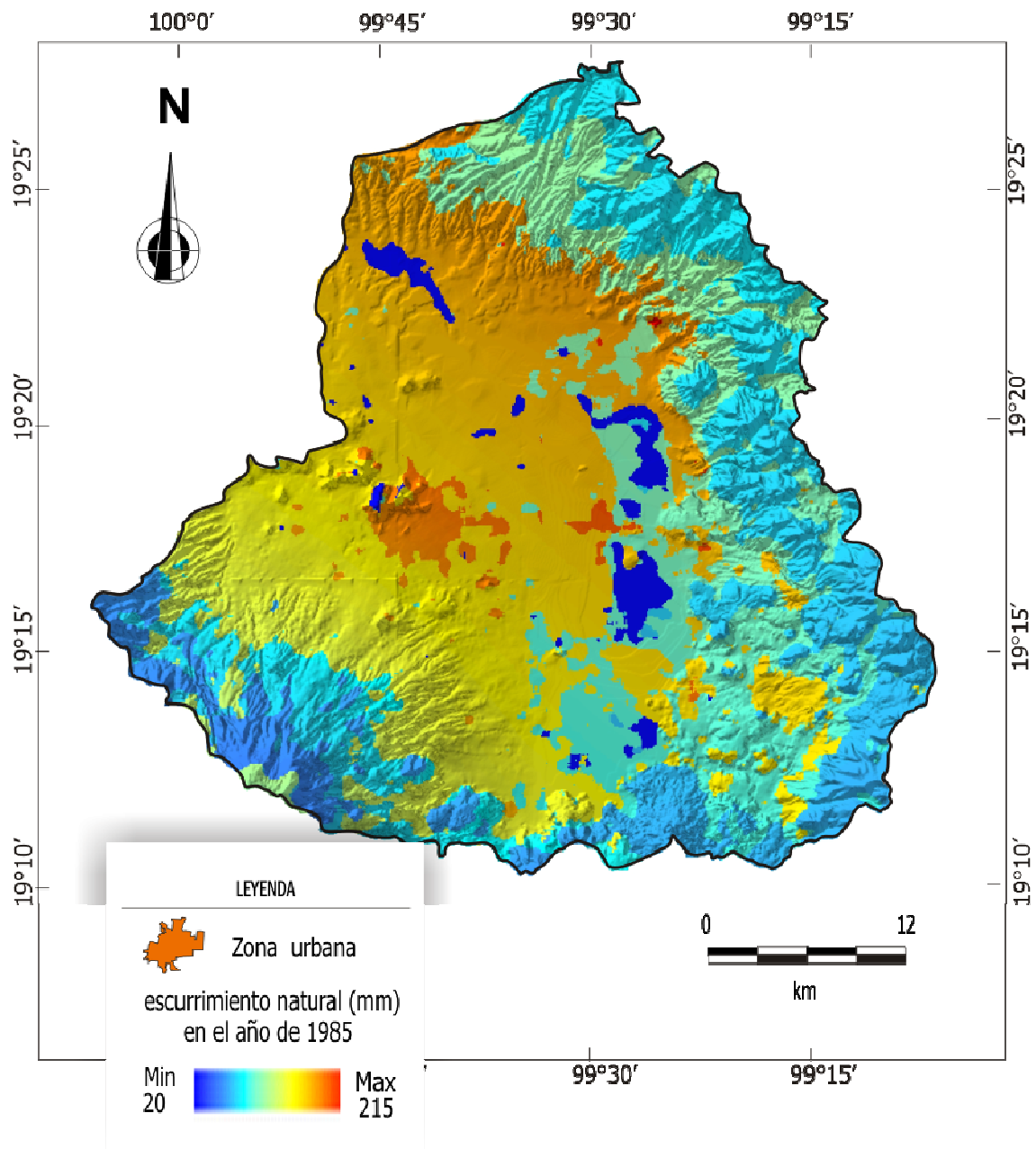


Figura 5.17 Mapa de escurrimiento natural de la cuenca para 1985. En la figura se puede observar que la mayor tasa de escurrimiento ocurre en la zona centro de la cuenca. Fuente elaboración propia

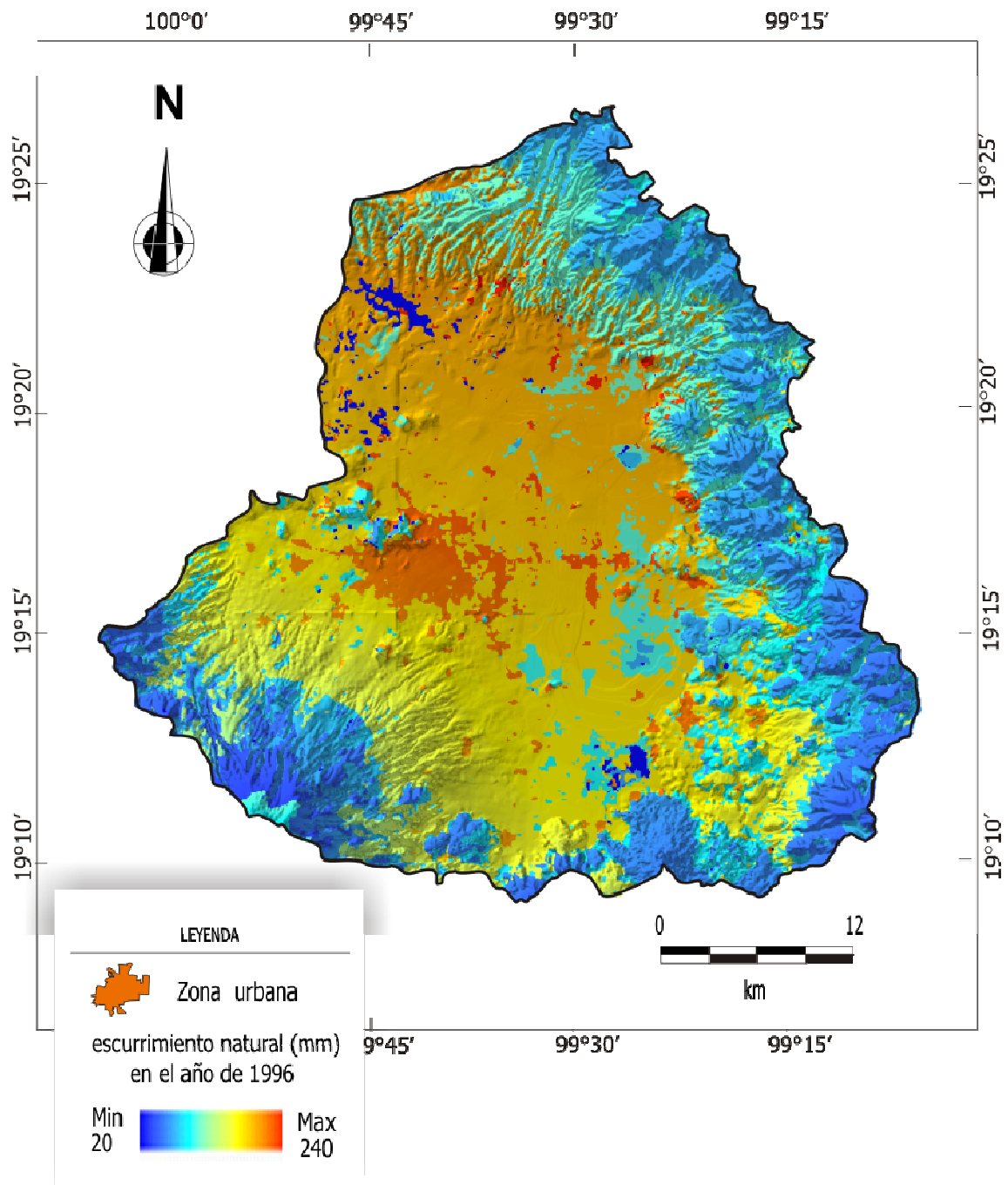


Figura 5.18 Mapa de escurrimiento natural de la cuenca para 1996. En la figura se puede observar que la mayor tasa de escurrimiento ocurre en la zona centro de la cuenca. Fuente elaboración propia

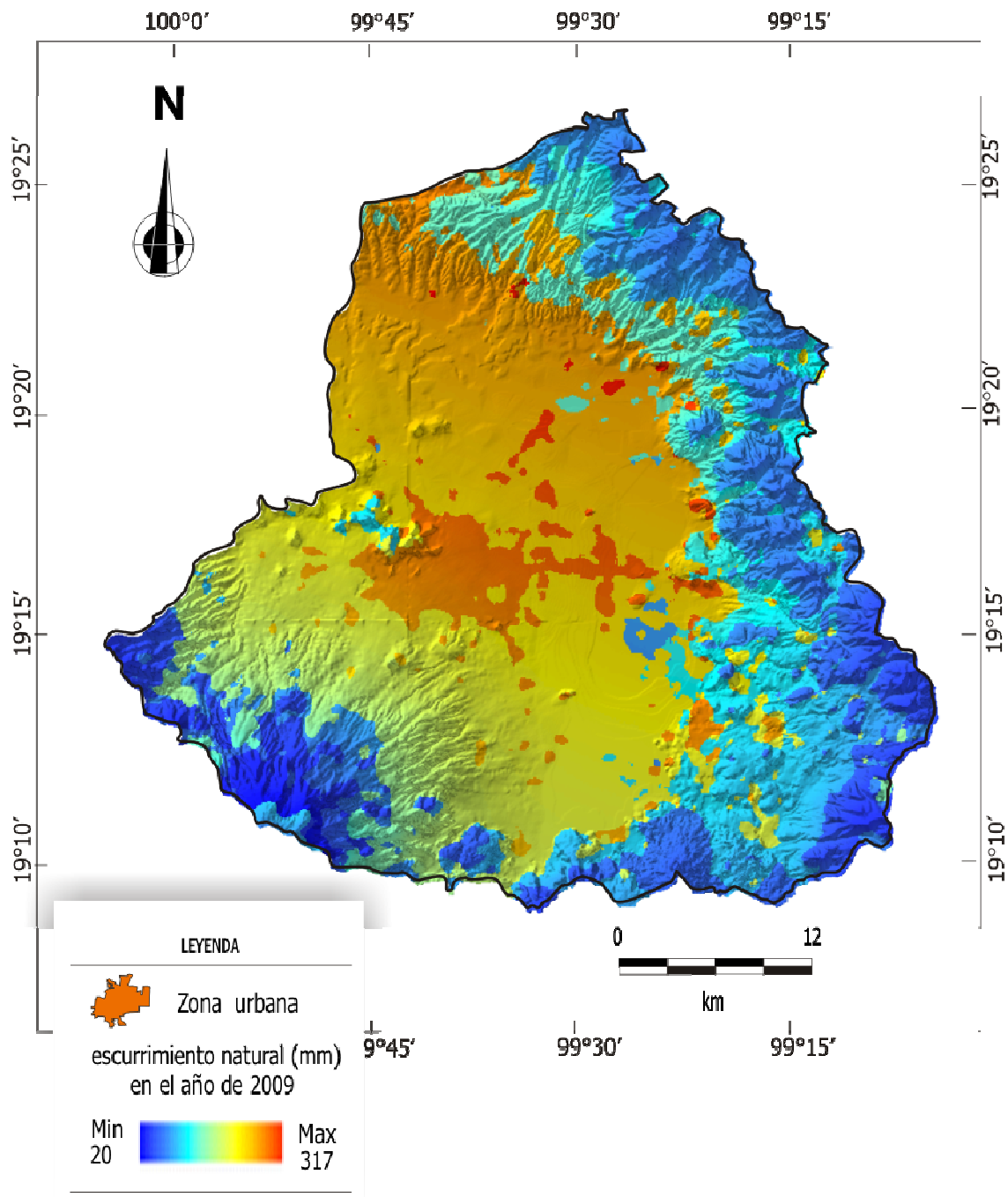


Figura 5.19 Mapa de escurrimiento natural de la cuenca para 2009. En la figura se puede observar que la mayor tasa de escurrimiento ocurre en la zona centro de la cuenca. Fuente elaboración propia.

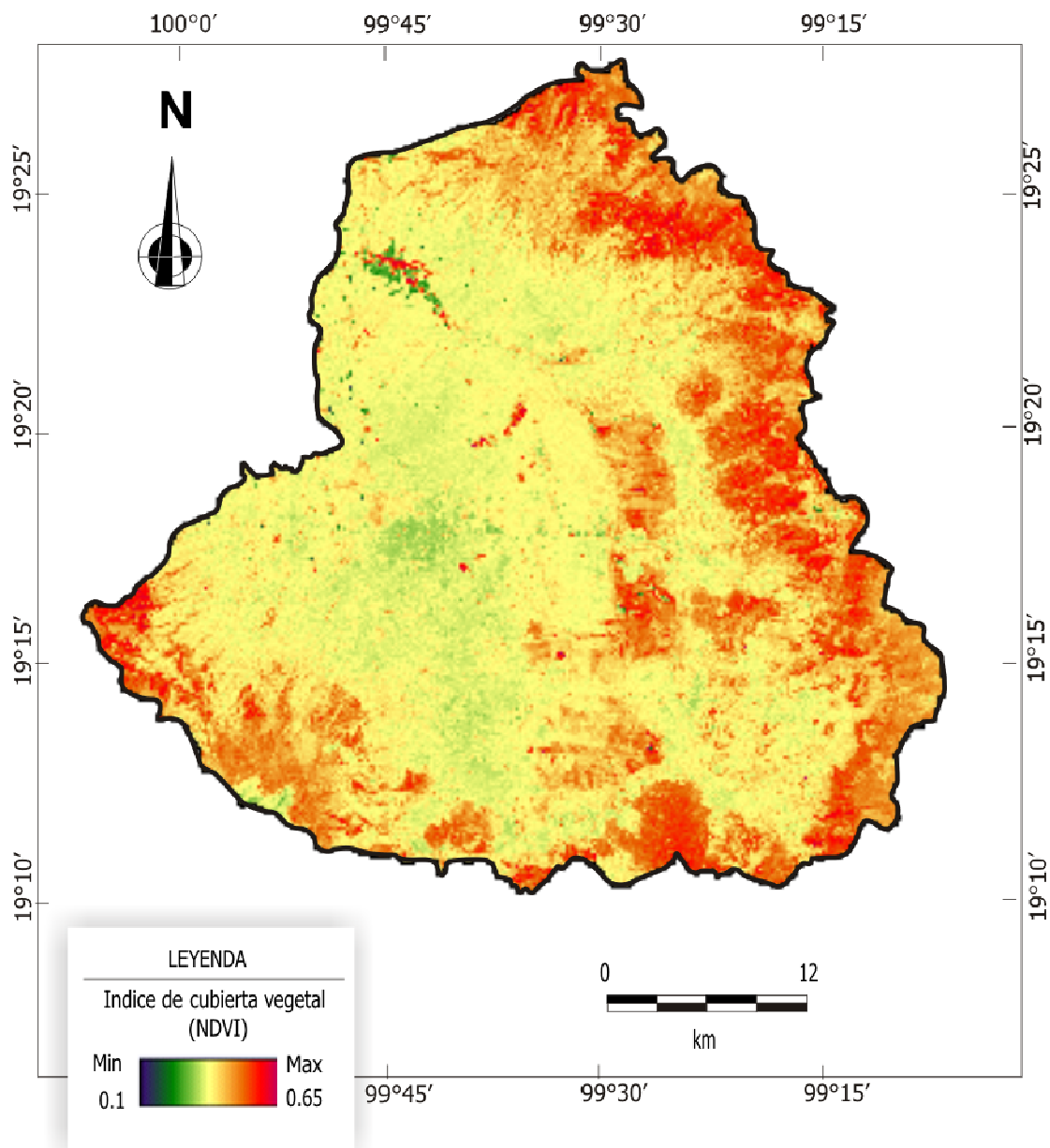


Figura 5.20 Mapa del Índice de Cubierta Vegetal (NDVI). El la figura se puede apreciar que el mayor índice de cubierta vegetal está en las zonas montañosas que limitan la cuenca y el menor Índice se presenta en el valle. Fuente elaboración propia a partir de las imágenes de satélite.

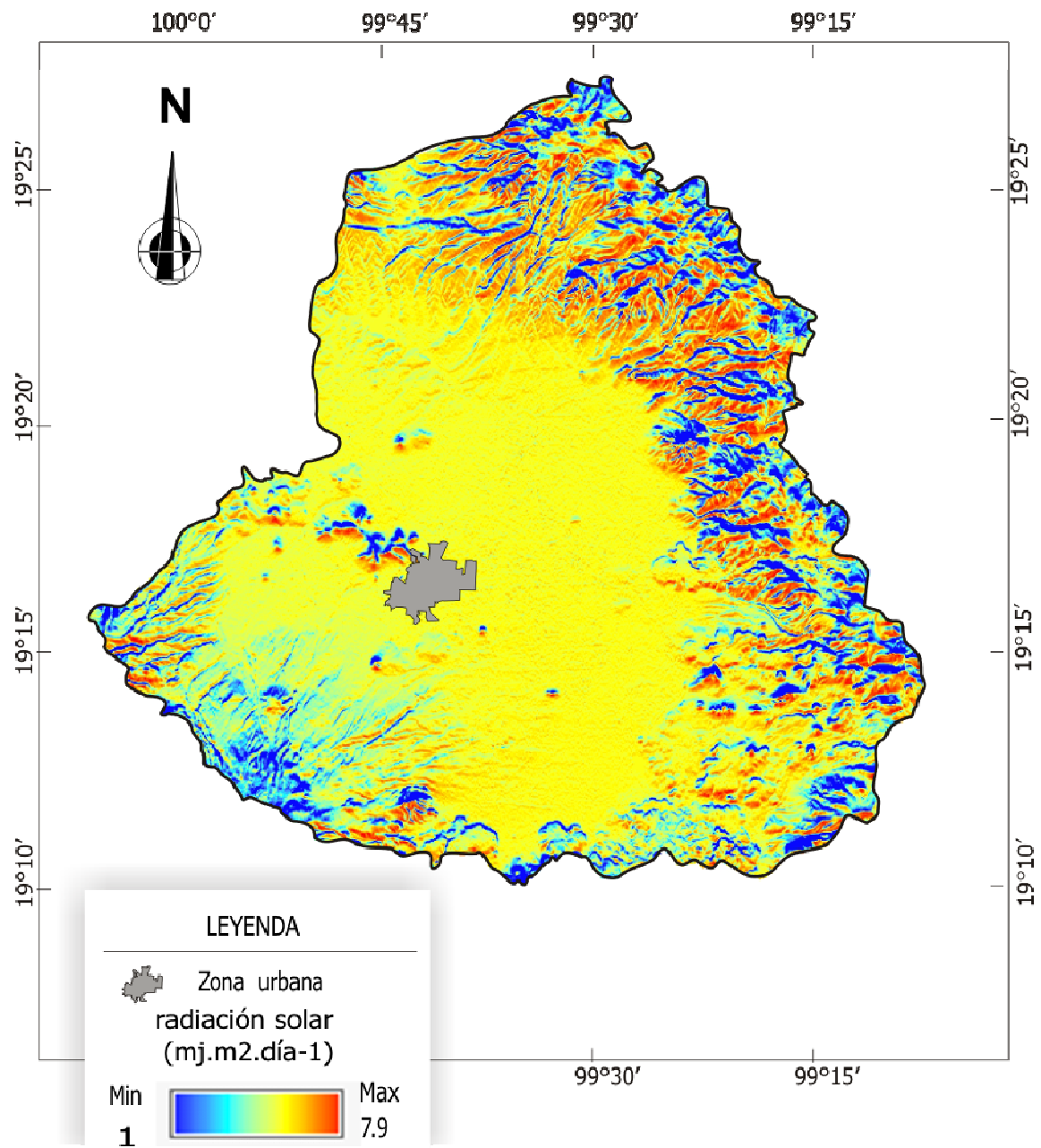


Figura 5.21 Mapa de radiación neta acumulada en la cuenca del Valle de Toluca. En la figura se puede apreciar que la mayor incidencia de la radiación ocurre en el valle y la menor radiación en las zonas altas que limitan la cuenca. Fuente elaboración propia.

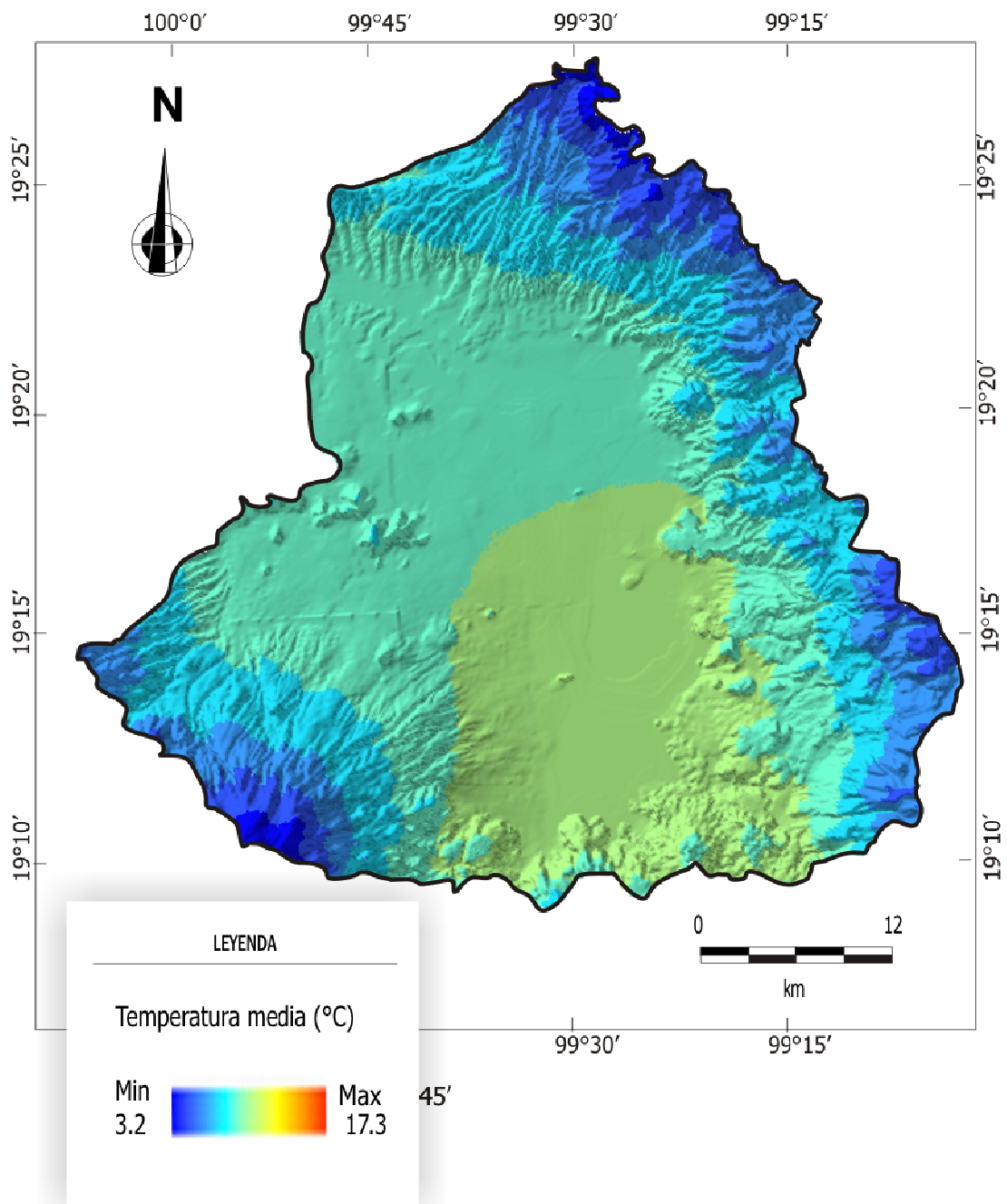


Figura 5.22 Mapa de temperatura promedio. En la figura se puede apreciar que la temperatura más alta ocurre en la zona centro de la cuenca y las temperatura más frías son en las partes montañosas que rodean la cuenca. Elaboración propia.

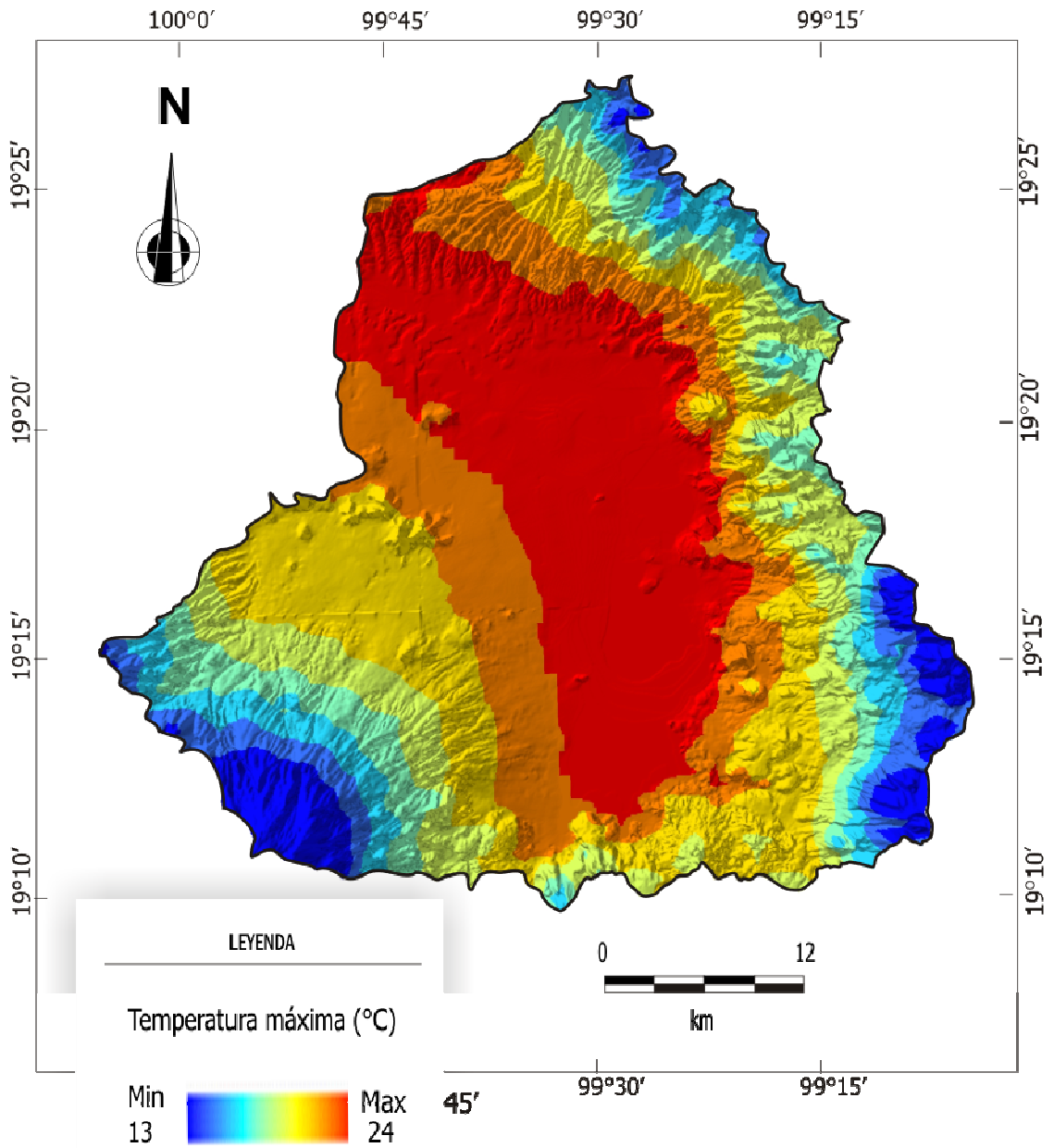


Figura 5.23 Mapa de temperatura máxima de la cuenca del Valle de Toluca. En la Figura se puede apreciar, la distribución de la temperatura máxima. Ésta es mayor en la parte central de la cuenca. Fuente elaboración propia.

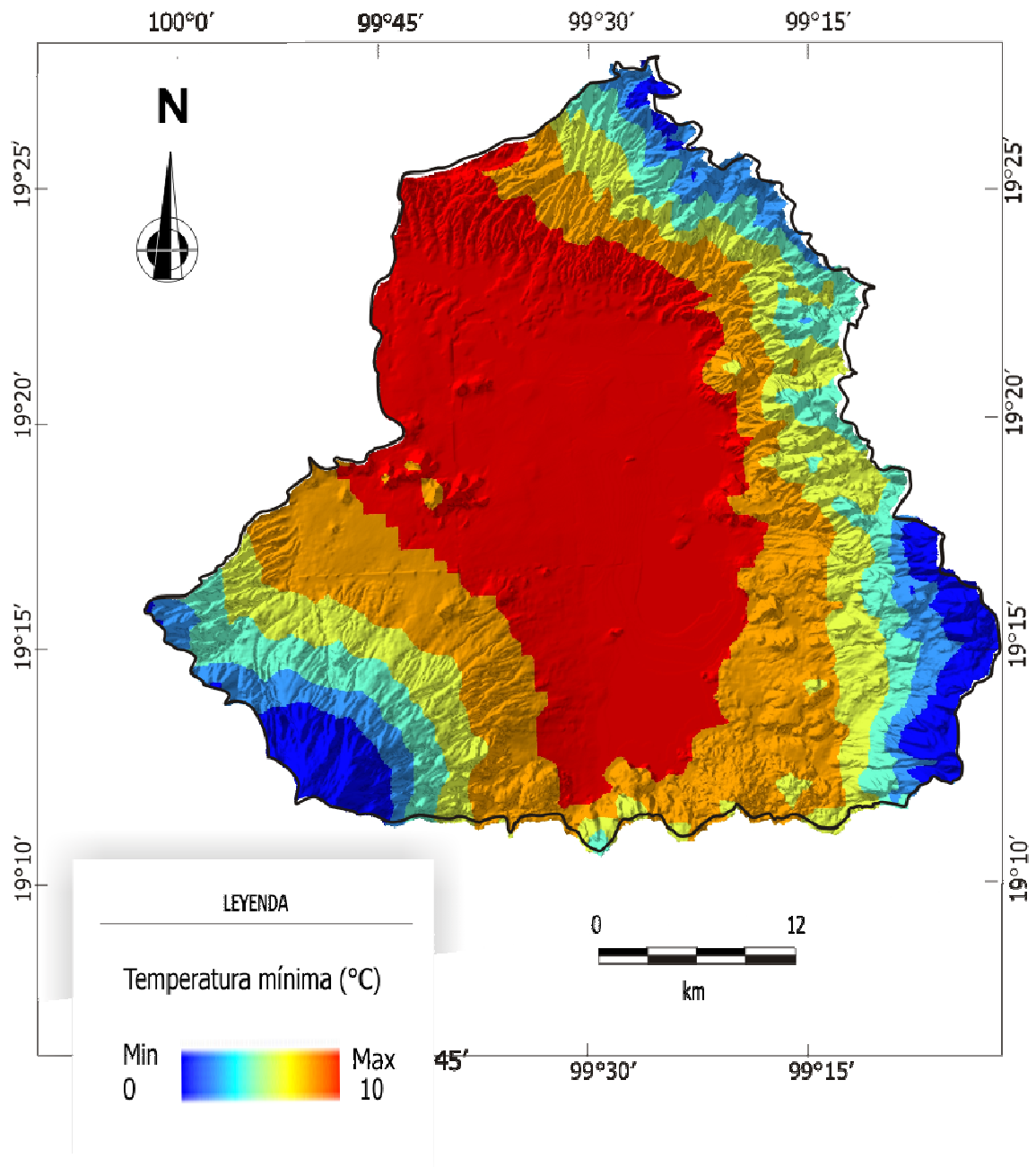


Figura 5.24 Temperatura mínima de la cuenca del Valle de Toluca. En él se puede apreciar que la temperatura más baja ocurre en las sierra de las Cruces y en los volcanes Nevado de Toluca y Guadalupeana. Fuente elaboración propia.

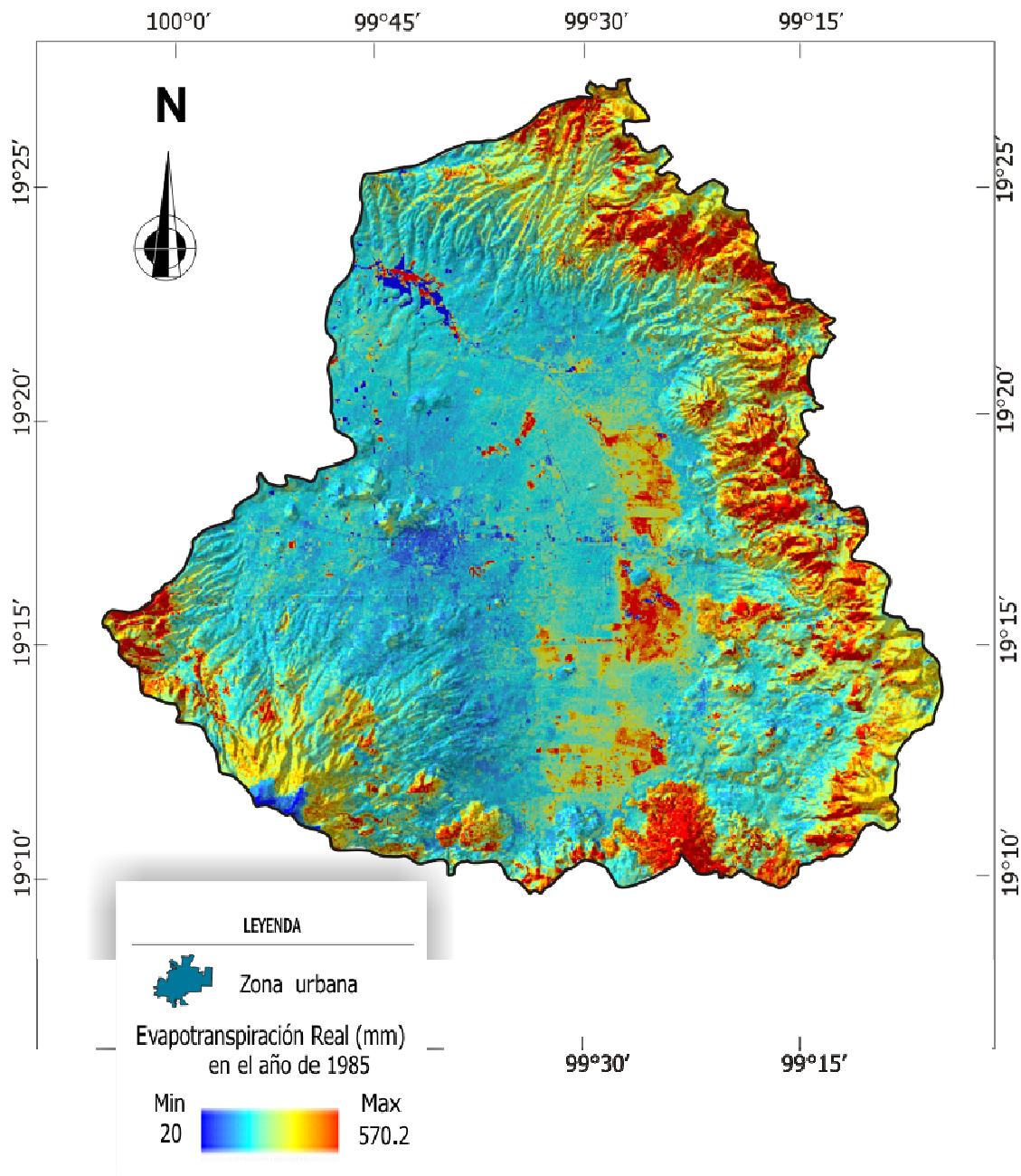


Figura 5.25 Mapa de la evapotranspiración real de la cuenca del Valle de Toluca para el año de 1985. En la figura se puede apreciar que las zonas altas que limitan la cuenca, es en donde se presentan los niveles más altos de evapotranspiración, mientras en la parte centro de la cuenca ésta es mínima. Fuente elaboración propia

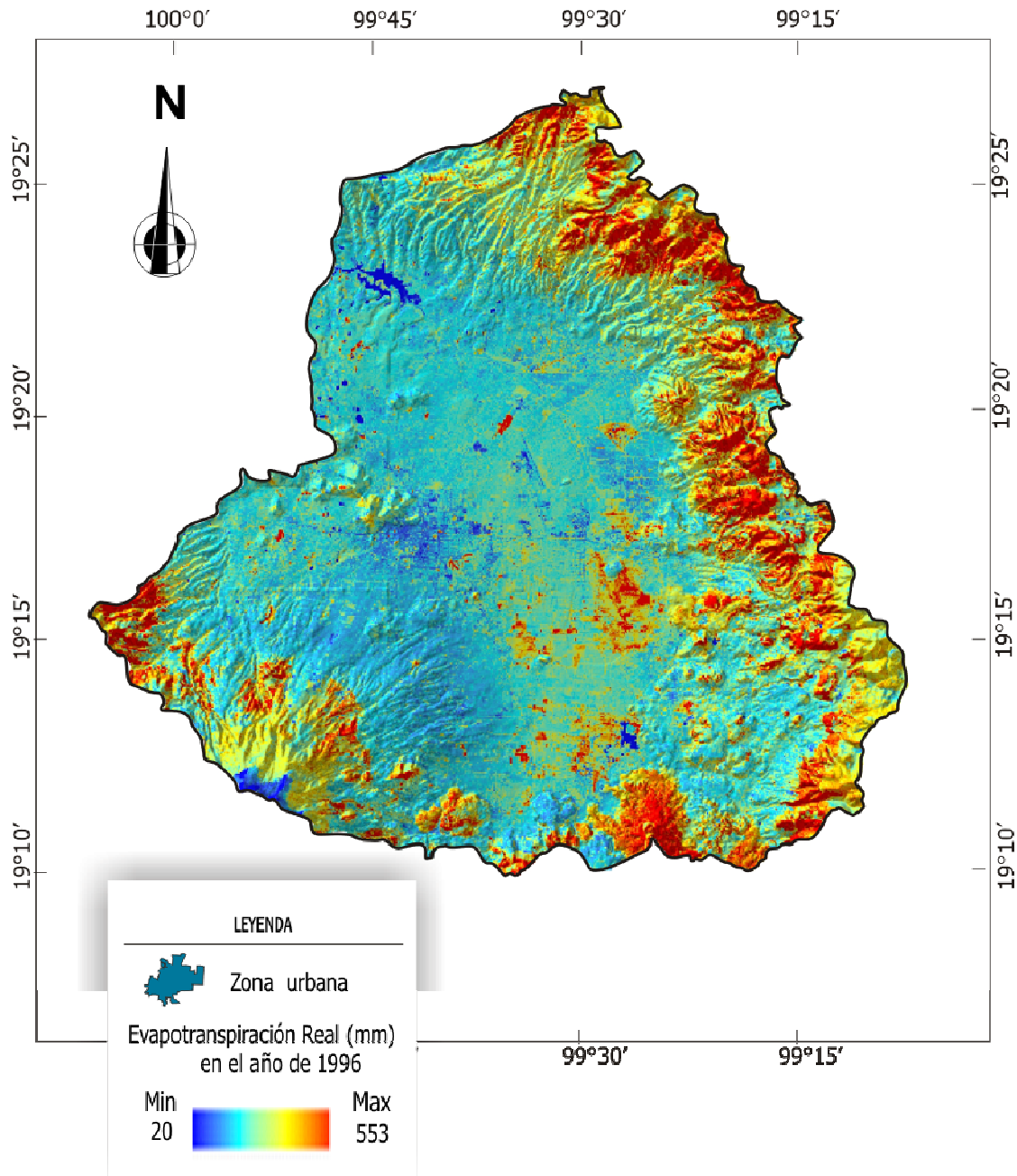


Figura 5.26 Mapa de la evapotranspiración real en la cuenca del Valle de Toluca, para el año 1996. En la figura se puede apreciar que las zonas altas que limitan la cuenca, es en donde se presentan los niveles más altos de la evapotranspiración, mientras en la parte centro de la cuenca ésta es mínima. Fuente elaboración propia

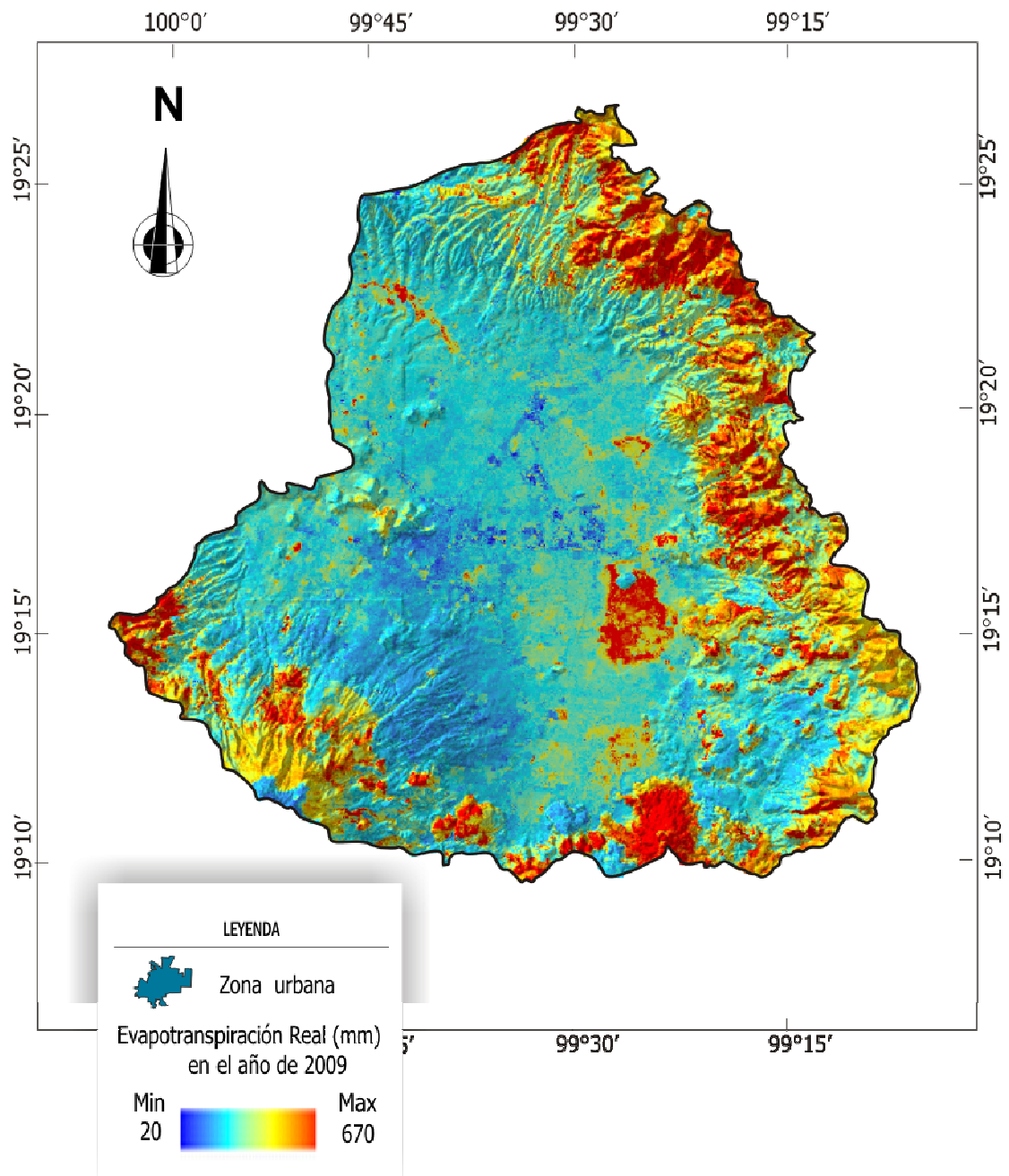


Figura 5.27 Mapa de evapotranspiración real de la cuenca del Valle de Toluca, para el año 2009. En la figura se puede apreciar que las zonas altas que limitan la cuenca, es en donde se presentan los niveles más altos de la evapotranspiración, mientras en parte centro de la cuenca la evaporación es baja. Fuente elaboración propia

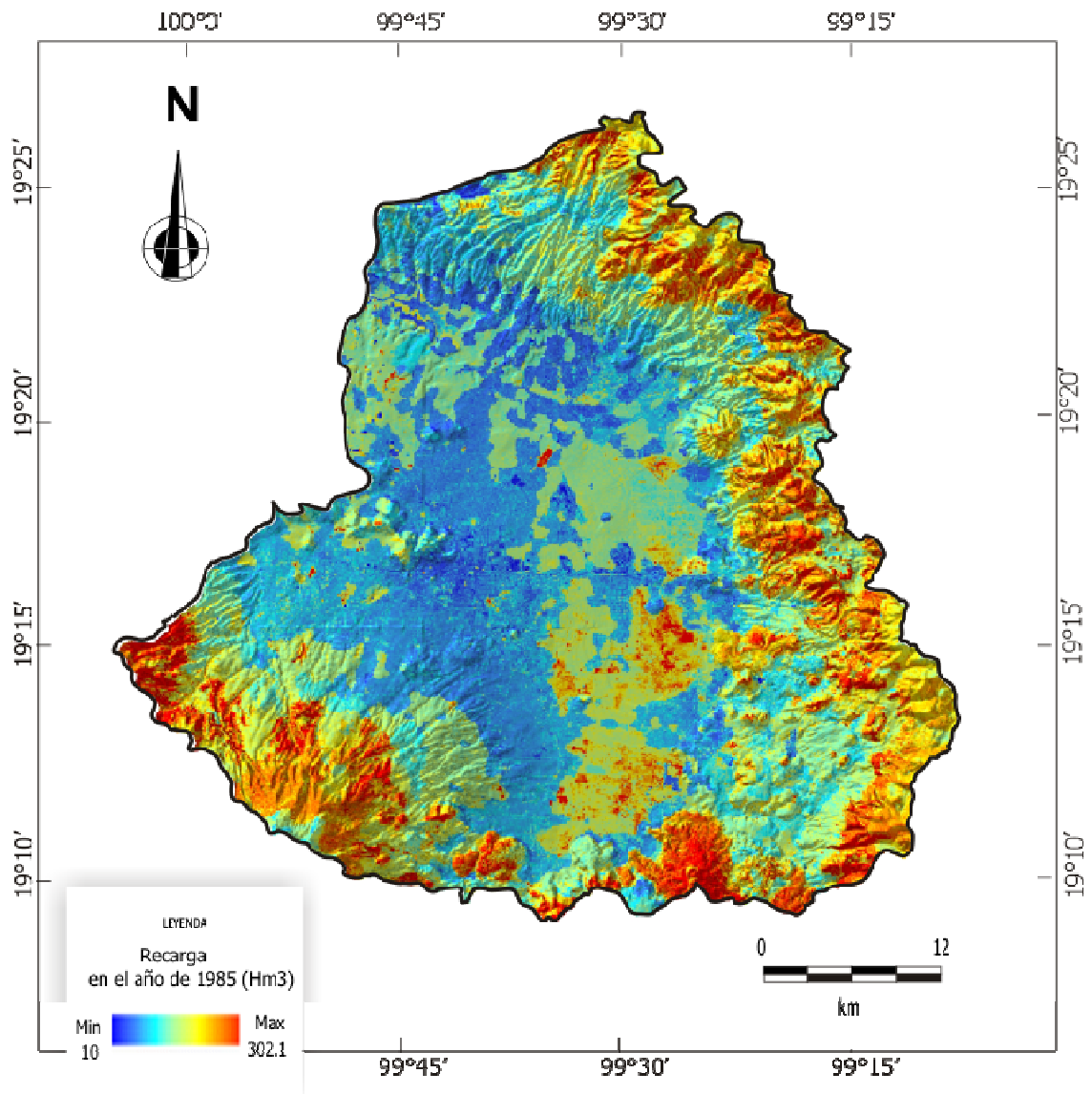


Figura 5.28 Mapa de recarga para el año de 1985. En la figura se puede apreciar que ésta ocurre en las zonas montañosas que limitan la cuenca. Fuente elaboración propia, obtenido a partir de los mapas de precipitación, escurrimiento y evapotranspiración real.

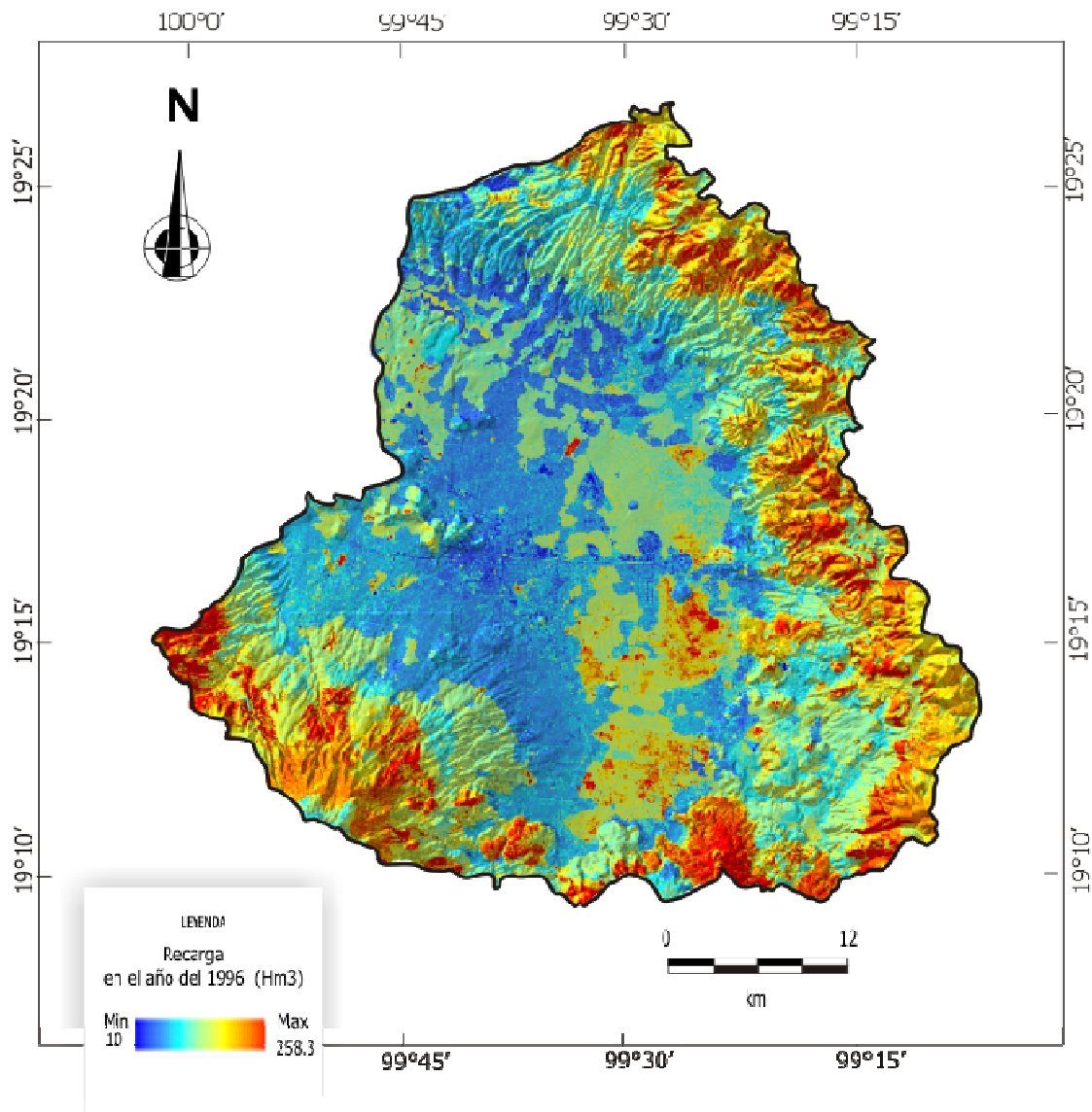


Figura 5.29 Mapa de recarga para el año de 1996. En la figura se puede apreciar que ésta ocurre en las zonas montañosas que limitan la cuenca. Fuente elaboración propia, obtenido a partir de los mapas de precipitación, escurrimiento y evapotranspiración real.

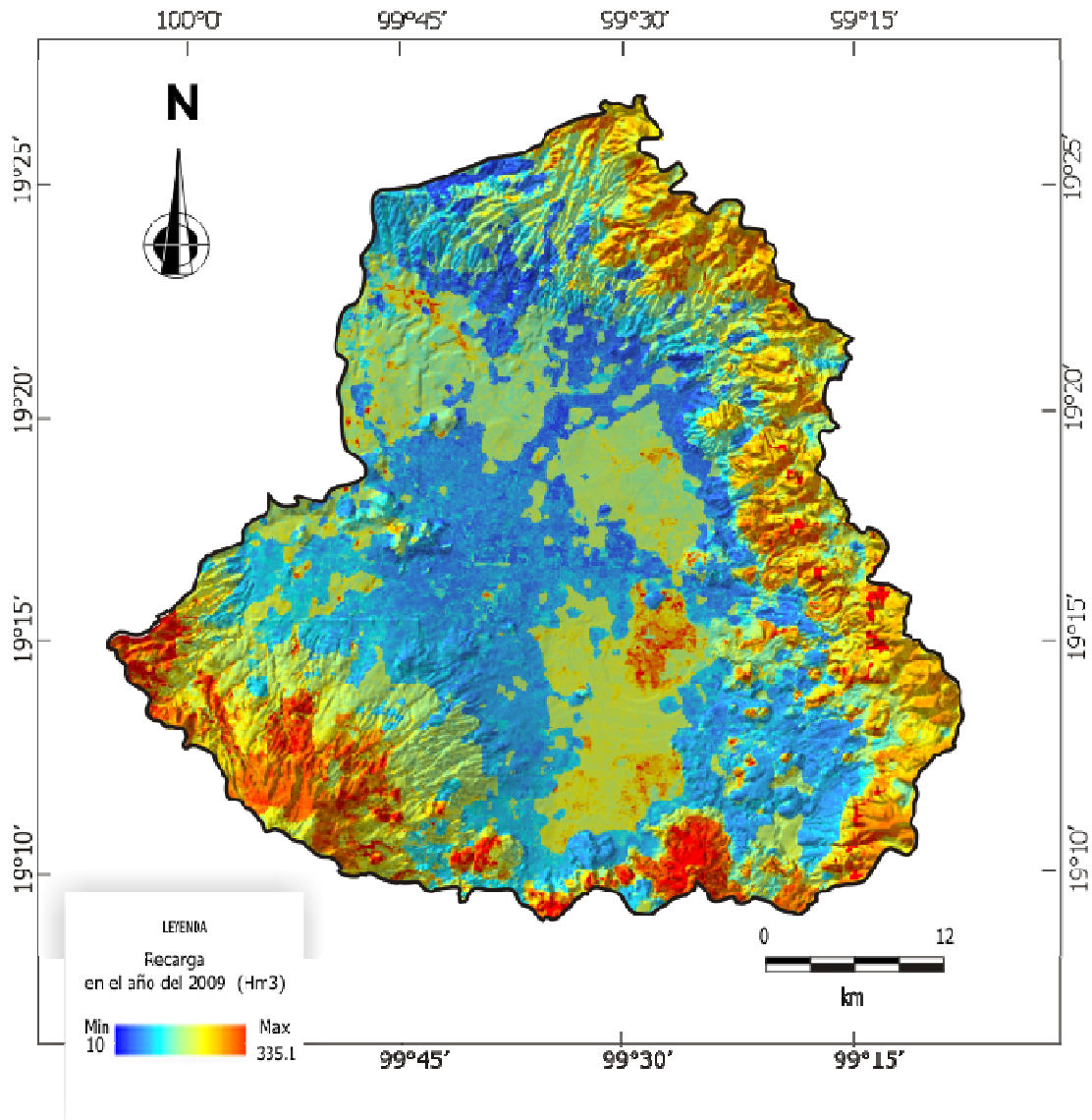


Figura 5.30 Mapa de recarga para el año de 2009. En la figura se puede apreciar que ésta ha disminuido en la Sierra de las cruces. Fuente elaboración propia, obtenido a partir de los mapas de precipitación, escurrimiento y evapotranspiración real.

5.6 Previsión del uso del suelo para el 2015-2020 y 2025

Para realizar la previsión del uso del suelo, se retomaron los resultados de la evaluación previamente obtenidos del uso del suelo, la metodología empleada para hacer la proyección, ya fue descrita en el capítulo anterior. Para aceptar los resultados de la proyección fue necesario obtener un valor de interacción del 80%, el siguiente paso fue seleccionar el módulo Change prediction, se registro el año para la predicción (2015-2020-2025) y se acepto el sub-modelo obteniendo como resultado la previsión del uso del suelo.

En las figuras 5.31, 5.32 y 5.33 se pueden apreciar, los cambios en el uso del suelo para los años 2015, 2020 y 2025. De manera general, la mancha presenta tendencias de expandirse hacia los municipios de: Metepec, Toluca, San Mateo Atenco, Lerma, Ocoyoacac, Almoloya del río y Capulhuac, mientras tanto el bosque seguirá perdiendo parte de su territorio, el suelo desnudo empezará a crecer considerablemente en las partes del suelo boscoso y la agricultura seguirá expandiéndose.

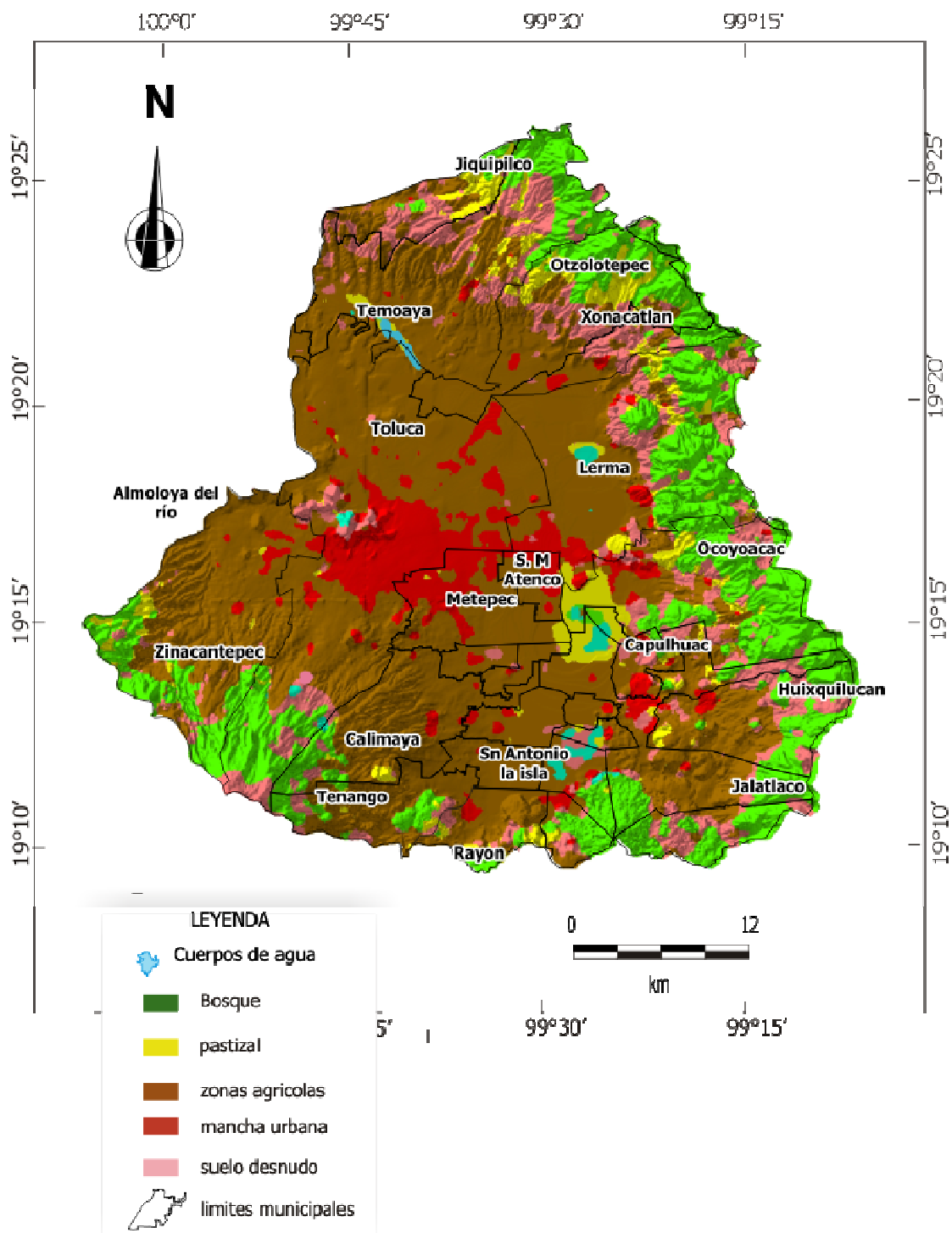


Figura 5.31 Mapa de proyección de uso suelo para el año 2015 con límites municipales. En la figura se puede apreciar la distribución de los usos del suelo Fuente elaboración.

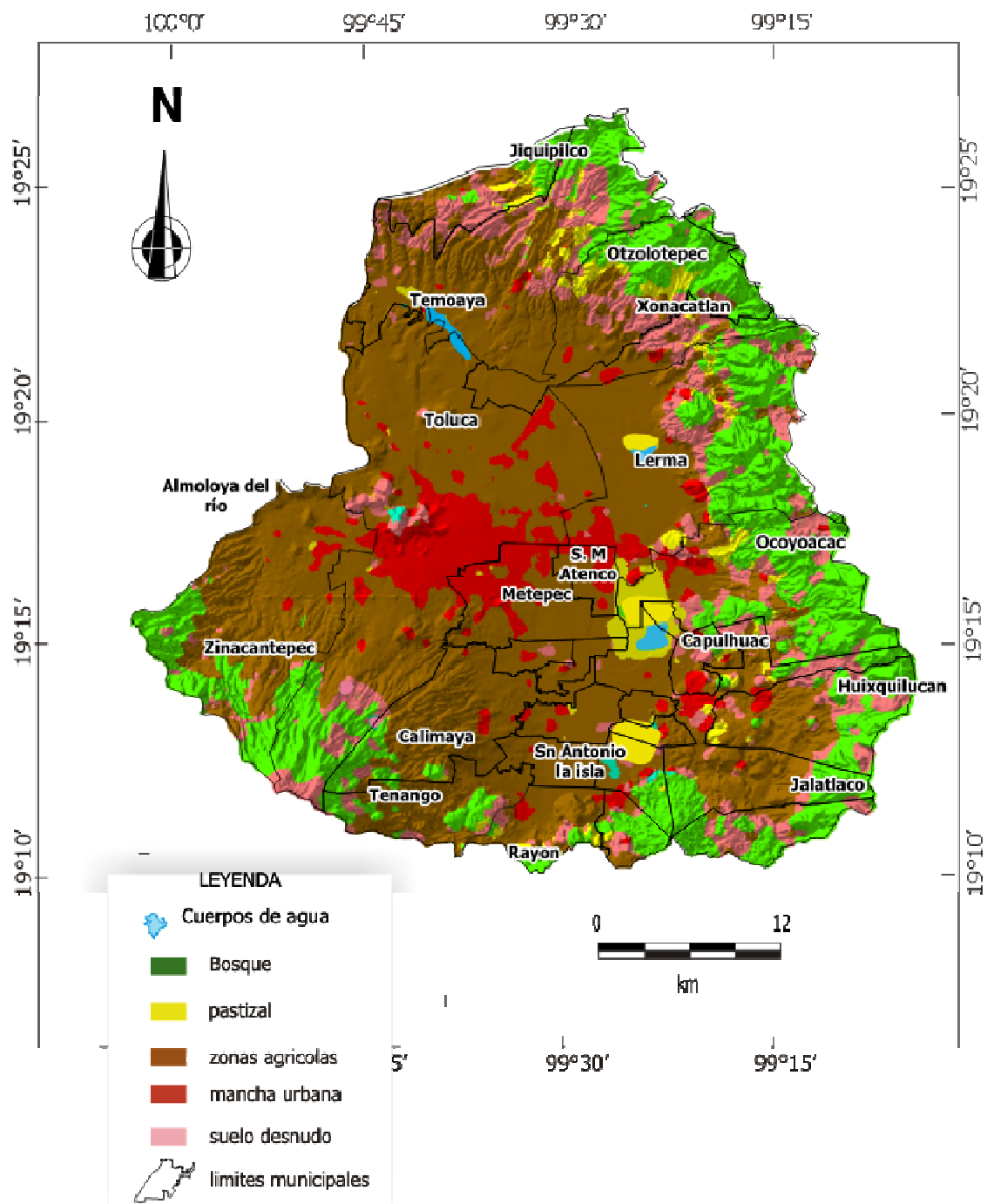


Figura 5.32 Mapa de proyección del uso suelo para el año 2020 con límites municipales. En la figura se puede apreciar la distribución de los usos del suelo. Fuente elaboración propia.

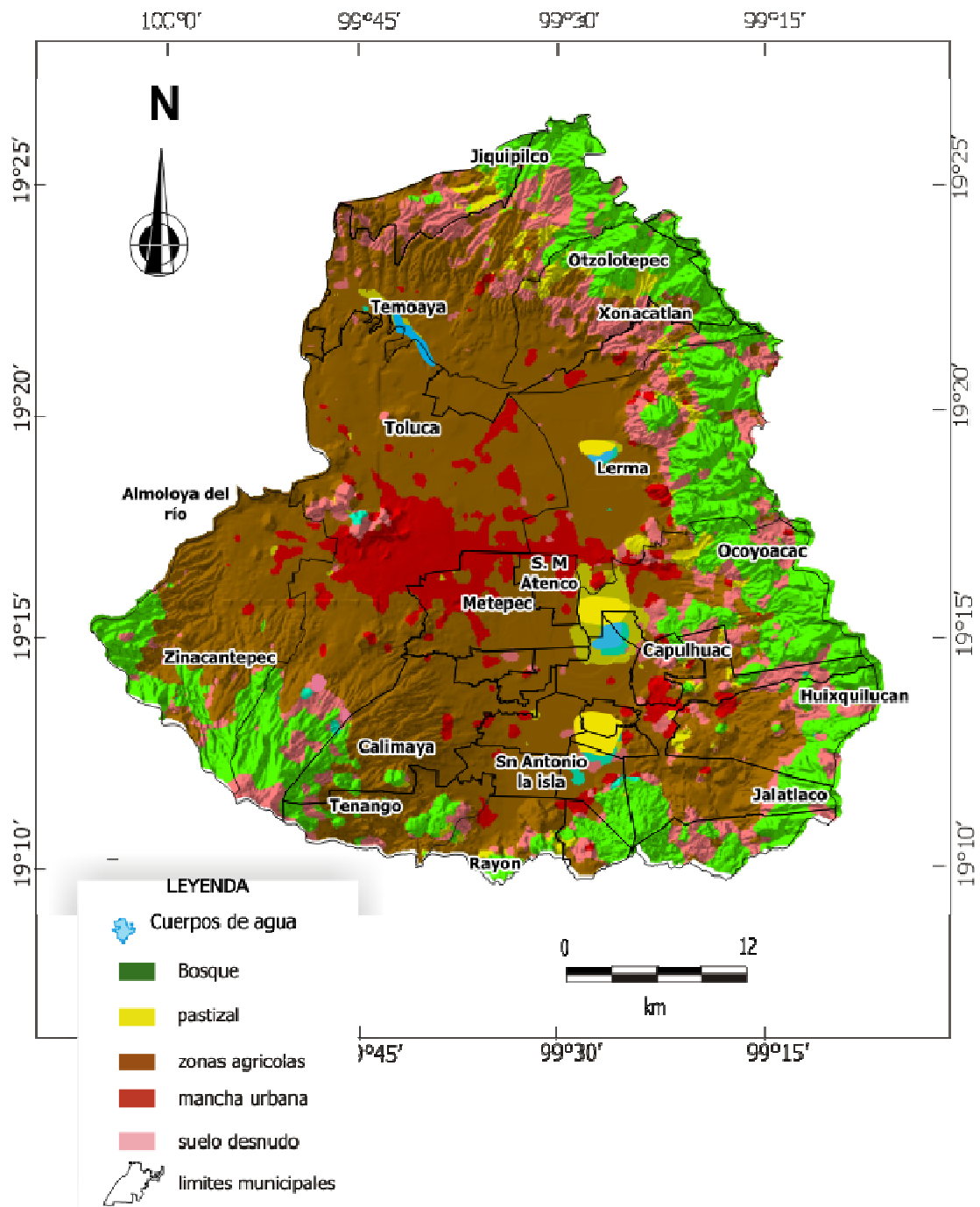


Figura 5.33 Mapa de proyección del uso suelo para el año 2025 con límites municipales. En la figura se puede apreciar la distribución de los distintos usos del suelo. Fuente elaboración propia a partir de la proyección del uso del suelo.

5.7 Análisis de la proyección de la recarga para el 2015-2020 y 2025

Asumiendo que los valores de la precipitación y la evapotranspiración para los años de proyección (2015, 2020 y 2025) se presentaran de manera constante y el escurrimiento estimado de acuerdo a los mapas del resultado de la proyección del uso del suelo, se tienen los siguientes resultado; para el año 2015 la recarga procedente de la precipitación puede oscilar en 278.3 Hm^3 , mientras que para el 2020 ésta también puede fluctuar en 267.3 Hm^3 y finalmente para el año 2025 la recarga puede ser de 285.3 Hm^3 . En las figuras 5.34, 5.35 y 5.36 se puede observar la posible tasa de distribución de la recarga.

De manera general, en las figuras se puede observar que las zonas montañosas que limitan la cuenca posiblemente sean las zonas en la que se siga efectuando la tasa de recarga y las zonas con crecimiento urbano sigan siendo las zonas con menor aporte a la recarga por precipitación. En las figuras se puede observar que la recarga puede disminuir, específicamente ésta puede decrecer en las zonas de las Sierra de las cruces y el algunas zonas de Volcán Nevado del Toluca.

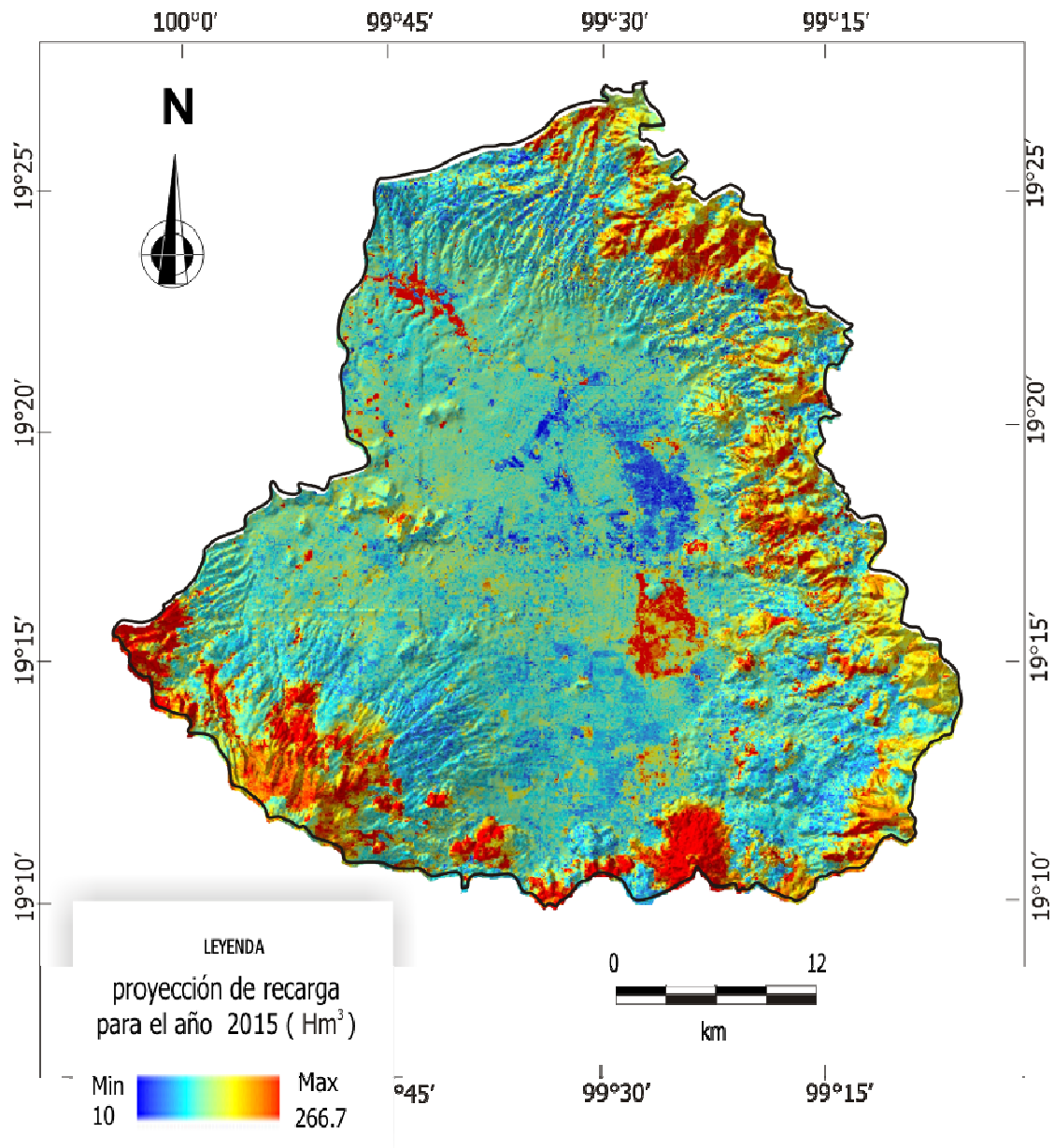


Figura 5.34 Mapa de proyección de la recarga para el año 2015. En la figura se puede apreciar la posible distribución de la recarga que puede ocurrir en las zonas montañosas que limitan la cuenca. Fuente elaboración propia.

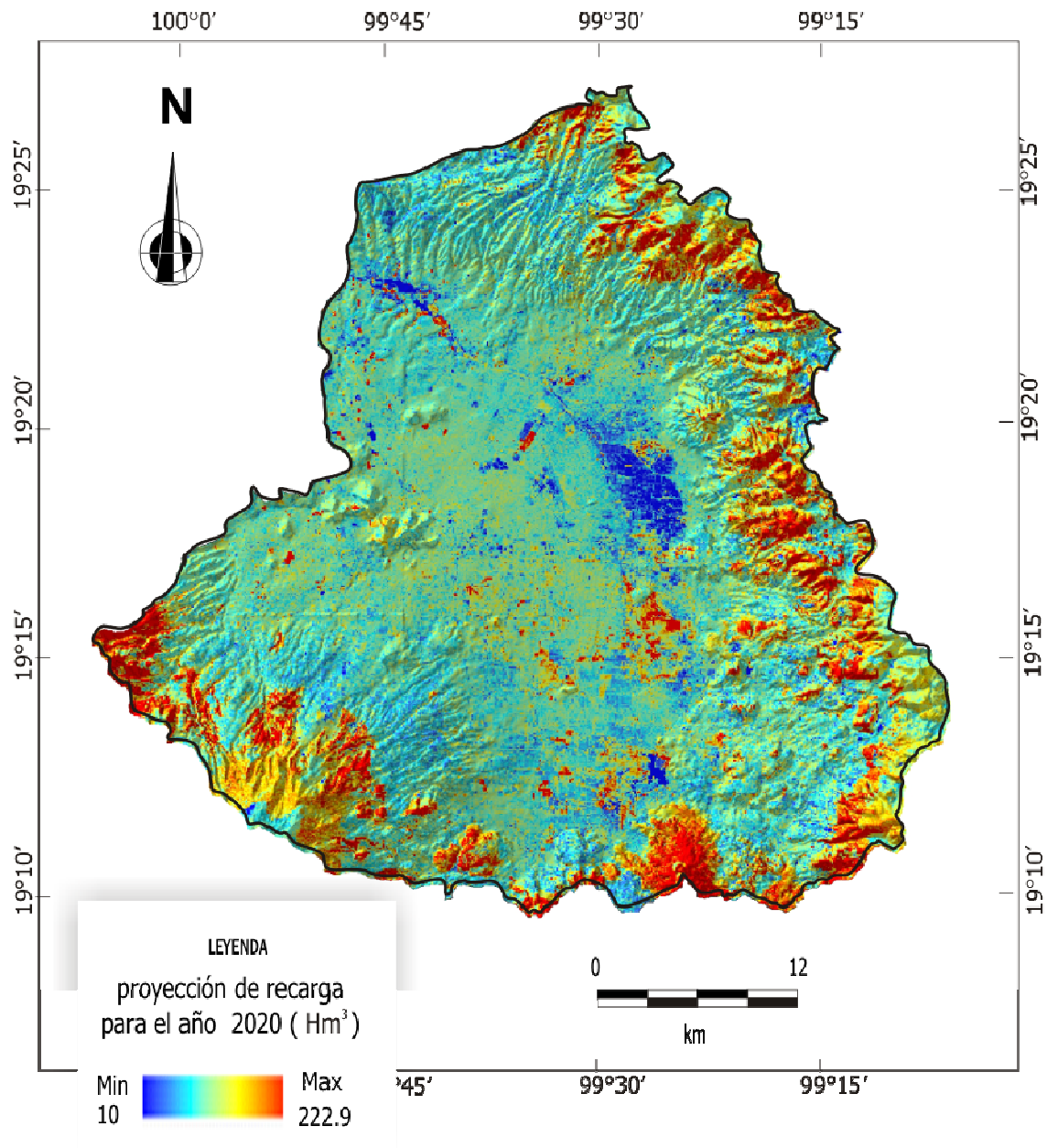


Figura 5.35 Mapa de proyección de la recarga para el año 2020. En la figura se puede apreciar la posible distribución de la recarga puede ocurrir en las zonas montañosas que limitan la cuenca. Fuente elaboración propia.

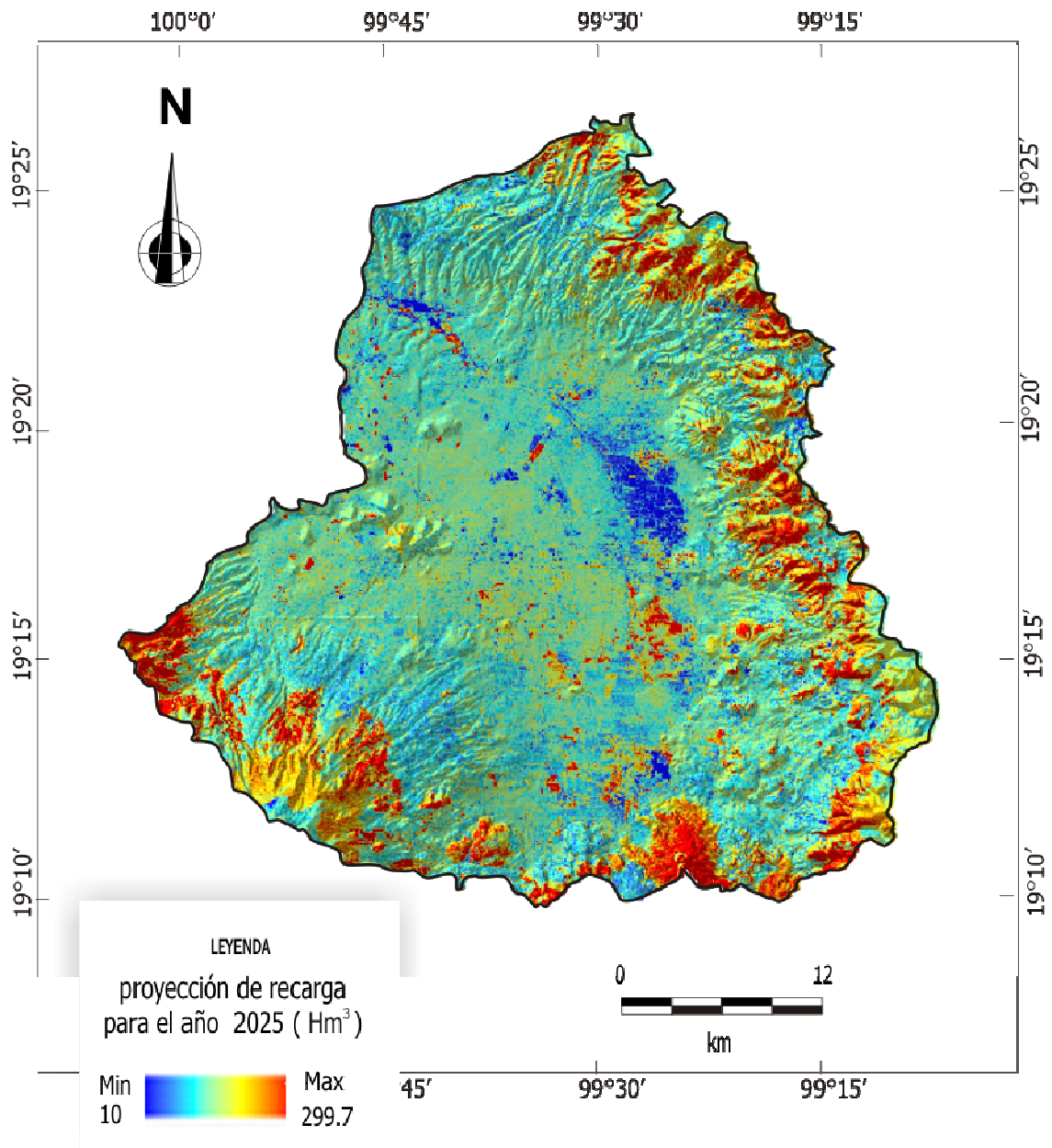


Figura 5.36 Mapa de proyección de la recarga para el año 2025. En la figura se puede apreciar la posible distribución de la recarga que puede ocurrir en las zonas montañosas que limitan la cuenca. Fuente elaboración propia.

5.8 Comparación y análisis de los resultados

Existen diversos estudios previos con respecto a la estimación de la recarga en la cuenca de estudio. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, en 1985 “ICATEC” realizó un estudio geohidrológico preliminar del Valle de Toluca “en el que se realizó un censo de 626 pozos, determinando un volumen de recarga anual de 364 Hm^3 . En 1996 Ariel y consultores S.A, desarrollaron el proyecto Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de las Redes de Observación del Acuífero valle de Toluca, con lo cual estimaron una recarga de $256.5 \text{ Hm}^3/\text{año}$.

Según Calderhead (2009), los estudios antes enunciados no presentan una descripción detallada del análisis que realizaron, en muchos de los casos, se realizaron censos de bombeo, de los cuales afirma que son incompletos. Él destaca la ausencia de información importante para realizar la estimación, también alude, “en algunos casos los resultados fueron determinados mediante promedios”.

Por otra parte Calderhead (2009) cuantificó la recarga en la cuenca del Valle de Toluca por medio del modelo HELP3 desarrollado por Schroeder et al., (1994), el objetivo del modelo es realizar la cuantificación de la recarga de forma espacial y temporal, para ello hizo uso de 16 variables (precipitación, temperatura media, radiación solar, humedad relativa, latitud, cobertura vegetal del suelo, curvas de pendientes, evaporación, coeficiente de infiltración, capacidad de campo, conductividad hidráulica y el límite del acuífero), del procesamiento de los datos en el software Calderhead, obtuvo una recarga de $376.2 \text{ Hm}^3/\text{año}$.

Finalmente Ortiz-Madrid (2010) estimó la recarga vertical al acuífero de Toluca, debido a la precipitación, tomando en cuenta las características topográficas, climatológicas, el tipo y uso del suelo, también evaluó la contribución de agua al acuífero de tipo entrópico de los cuerpos de agua, obteniendo como resultado la recarga por cuerpos de agua, que fue del orden de $56.87 \text{ Hm}^3/\text{año}$; mientras que la recarga por precipitación es del orden de $318.64 \text{ Hm}^3/\text{año}$, sumando así, un total de recarga de $375.6 \text{ Hm}^3/\text{año}$.

En la presente investigación se cuantificó la recarga con la variación espacial y temporal del crecimiento urbano y la deforestación, asimismo se generaron mapas de la precipitación, escurrimiento, y evapotranspiración real. Del procesamiento de los mapas generados para cada año en estudio se obtuvieron los siguiente valores de recarga; para 1985 la recarga osciló en 302.1 Hm^3 mientras que para 1996 ésta fue de 258.3 Hm^3 y finalmente en el 2009 la recarga fue de 335.1 Hm^3 . En la figura 5.37 se puede apreciar que los resultados obtenidos de recarga en 1985 son menores a los obtenidos por la empresa ICATEC, en 1996 la recarga obtenida fue similar a la obtenida por la empresa de Ariel y consultores y finalmente en el 2009 el resultado fue menor a los obtenidos por Calderhead y Ortiz-Madrid.

Por otro lado, también se estimó la recarga de acuerdo a la metodología que establece la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000), ésta, no precisa los datos de estimación los valores obtenidos mediante este método limitan el análisis por que se trabaja con datos puntuales, ejemplo de lo anterior es la estimación del escurrimiento natural de la cuenca; éste, se estimó de acuerdo a los valores de estimación que establece la norma. Para estimar la K fue necesario hacer uso del mapa de uso del suelo de la CONABIO (1996) para los tres periodos es estudio; situación que pone de manifiesto la ausencia de los cambios del uso del suelo (deforestación y crecimiento urbano). Tal situación, limita el análisis de la información y de los resultados.

Otra de las desventajas que se tiene al realizar la estimación de la recarga es trabajar la base de datos sin estimar los valores faltantes de la precipitación y la temperatura máxima y mínima principalmente. Para realizar una buena estimación de recarga es necesario hacer un buen análisis de las parámetros necesarios en el tema.

Realizar la estimación de la recarga mediante un SIG es crucial ya que el proceso de los datos es de forma real, precisa y puntual, cabe hacer mención, los datos son distribuidos temporal y espacialmente. La cuantificación de la recarga en un SIG es más favorable para realizar el análisis, ya que se puede analizar las distintas interacciones que intervienen en los procesos de las distintas variables que intervienen en la recarga. La importancia de estimar la recarga mediante un SIG es poder visualizar los parámetros que intervienen y

sobre todo se pueden derivar una serie de recomendaciones en torno a los cambios que ha sufrido la cuenca. Por otro lado, estimar la recarga mediante una base de datos históricos es más sencillo, pero el resultado solo se limita a obtener un valor.

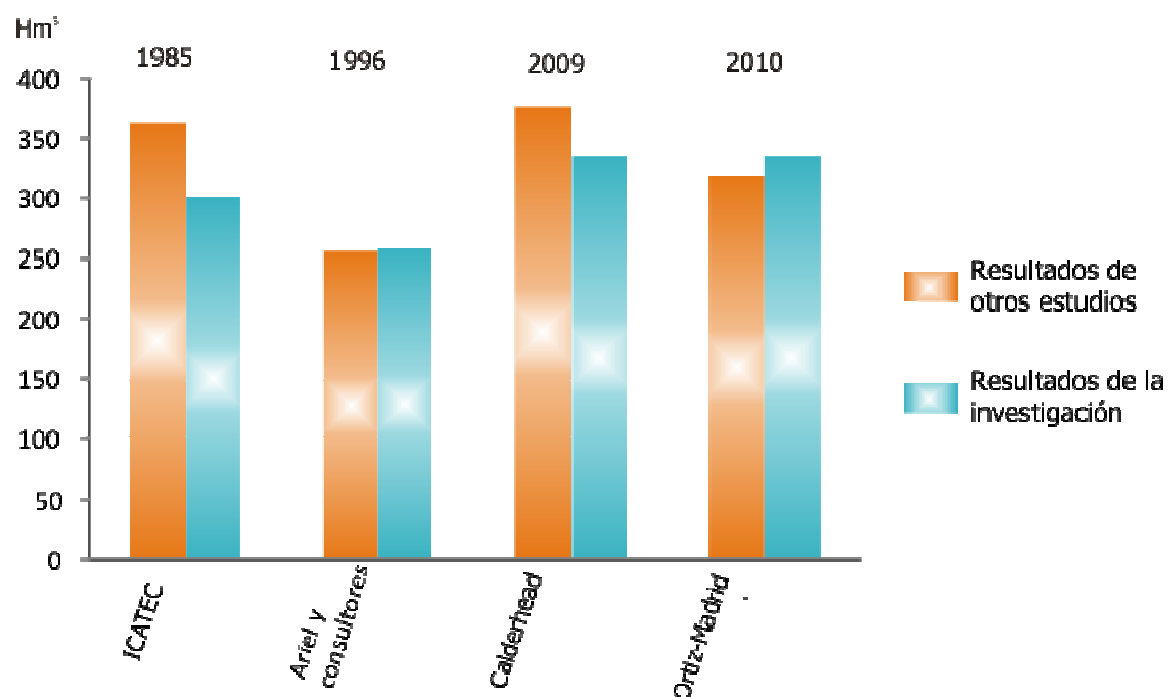


Figura 5.37 Gráfica de comparación de resultados de la recarga para los años de estudio. En la figura se puede apreciar que los resultados obtenidos algunos son similares y otros difieren. Fuente elaboración propia.

4.9 Abastecimiento de agua potable y crecimiento urbano

4.9.1 Evaluación del crecimiento urbano y consumo de agua potable en 1985-1996-2009

De acuerdo con el censo de población y vivienda, en las últimas décadas el crecimiento demográfico se ha expandido considerablemente. Tan solo en 1985 la población en la cuenca oscilaba en 970844, ya para 1996 la población creció 141083, haciendo un total de 1111927 habitantes y finalmente para el 2009 ésta ascendió a 785014 sumando un total de 1896941 ciudadanos asentados dentro de la cuenca. Es importante mencionar, la estimación de la población se realizó para los municipios que se encuentran asentados totalmente en la cuenca.

La población de la cuenca representa cerca del 13% de la población total del Estado de México. Los municipios con mayor crecimiento son: Toluca, en 1985 había 357071 y en el 2009 ascendió a 832447 habitantes, Metepec de 83030 y sumó a 218657 habitantes y Lerma éste paso de 62066 a 114198 habitantes. La descripción anterior es para los municipios el periodo 1985-2009. Mientras que los municipios de menor crecimiento son: Texcalyacac, Almoloya del Río. Atizapán, Chapultepec, San Antonio la Isla y Rayón, en la tabla (5.10) se puede apreciar la tasa de población para cada municipio, asimismo se puede apreciar los municipios de mayor población (**) y menor población (*)

Los municipios que más agua consumen son: en primer lugar el municipio de Toluca con un consumo de $60.8 \text{ Hm}^3/\text{año}$, seguido de Metepec, con $16 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y Lerma con $8.3 \text{ Hm}^3/\text{año}$ los consumos anteriores son para el año 2009, lo antes descrito se puede observar en la tabla (5.10). En las última tres décadas el consumo de agua ha ido en incremento, tan solo en 1985 se consumieron 70.9 Hm^3 de agua, mientras en 1996 el consumo incremento a 81.2 Hm^3 y en el 2009 el consumo aumento 57.3 Hm^3 , en total se consumieron 138.5 Hm^3 . Cabe hacer mención que los resultados del consumo de agua están estimados para los municipios que se encuentran totalmente en la cuenca con una dotación de agua de 200 litros por habitante al día.

En comparación con los valores obtenidos de la recarga se puede prever que la extracción de agua para abastecer las necesidades hídricas de la población no superan la capacidad de recarga. Sin embargo falta estimar los consumos que hacen: la industria, la ganadería y el agua que se destina a la ciudad de Toluca. De manera general, si el agua subterránea del acuífero se destinará únicamente para abastecer las necesidades de la población, la cuenca no presentaría problemas de déficit hídrico.

4.9.2 Perspectiva del crecimiento urbano y del consumo de agua potable para el 2015-2020 y 2025

De acuerdo a las estadísticas del consejo nacional de población (CONAPO, 2011) la población de la cuenca puede tender a crecer para el 2015 a 2077292, para el 2020 la tendencia del aumento de la población es de 168400 habitantes sumando un total de 2225696 habitantes y para el 2015 la predilección es de 2403169 habitantes. Los municipios con mayor crecimiento son Toluca con 77561 habitantes, Metepec con 8368 habitantes, Zinacantepec con 16135 habitantes y Lerma con 6687 habitantes. Cabe hacer mención, las cifras anteriores del crecimiento de la población es en promedio para los años de proyección. Específicamente, los municipios de Toluca y Zinacantepec tienen mayor tendencia de crecimiento humano.

Concerniente al consumo de agua potable en los mismos años de proyección se tiene, para el 2015 se pueden llegar a consumir 151.6 Hm^3 , para el 2020 este puede incrementar a 163.9 Hm^3 y finalmente en el 2025 éste puede oscilar en 175.4 Hm^3 . Se puede apreciar que el consumo del agua incrementará en promedio 12 Hm^3 por cada año de proyección, la tendencia en el consumo de agua es a disminuir; dicha tendencia puede ser porque la población también presenta tendencias a disminuir. Lo antes descrito se puede apreciar en la tabla(5.11) concerniente al crecimiento de la población y al consumo de agua potable, en la tabla también se puede apreciar los municipios con mayor población y consumo de agua (**).

Tabla 5.10 Crecimiento urbano y consumo de agua potable en la cuenca del Valle de Toluca (1985-1995-2010)

| Municipios | población | | | Consumo de agua potable <i>Hm</i> ³ | | |
|------------------|---------------|----------------|----------------|---|----------------|----------------|
| | 1985 | 1995 | 2010 | 1985 | 1995 | 2010 |
| Almoloya del Río | 6485 | 6777 | 9179 | 0.473 | 0.494 | 0.670 |
| Atizapán | 5205.5 | 5339 | 9841 | 0.380 | 0.389 | 0.718 |
| Calimaya | 23391 | 24906 | 42859 | 1.707 | 1.818 | 3.128 |
| Capulhuac | 19757.5 | 321258 | 33587 | 1.442 | 1.551 | 2.451 |
| Chapultepec | 3769 | 3863 | 7640 | 0.275 | 0.281 | 0.557 |
| Jalatlaco | 13072 | 14047 | 21743 | 0.954 | 1.025 | 1.587 |
| Lerma** | 62065.5 | 66912 | 114198 | 4.530 | 4.884 | 8.336 |
| Metepec** | 111649 | 140268 | 218657 | 8.150 | 10.239 | 15.961 |
| Ocoyoacac | 35673.5 | 37395 | 59659 | 2.604 | 2.729 | 4.355 |
| Otzolotepec | 34759.5 | 40407 | 79056 | 2.537 | 2.949 | 5.771 |
| Rayón | 6357 | 7026 | 12993 | 0.4640 | 0.512 | 0.948 |
| S. A. la Isla | 8412.5 | 7321 | 12498 | 0.614 | 0.534 | 0.912 |
| S. M. Atenco | 37822.5 | 41926 | 74966 | 2.761 | 3.060 | 5.472 |
| Temoaya | 41773.5 | 49427 | 88133 | 3.049 | 3.608 | 6.433 |
| Texcalyacac * | 2671 | 2961 | 5212 | 0.194 | 0.216 | 0.380 |
| Tiangustenco | 39732.5 | 42448 | 72450 | 2.900 | 3.098 | 5.288 |
| Toluca ** | 422341.5 | 487612 | 832447 | 30.830 | 35.595 | 60.768 |
| Xonacatlán | 24191.5 | 28837 | 49413 | 1.765 | 2.105 | 3.607 |
| Zinacantepec** | 71714.5 | 83197 | 152410 | 5.235 | 6.0733 | 11.125 |
| Total | 970844 | 1111927 | 1896941 | 70.871 | 81.1706 | 138.476 |

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.11 Crecimiento urbano y consumo de agua potable en la cuenca del Valle de Toluca (2015-2020 y 2025)

| Municipios | población | | | Consumo de agua potable <i>Hm</i> ³ | | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|---|---------------|---------------|
| | 2015 | 2020 | 2025 | 2015 | 2020 | 2025 |
| Almoloya del Río | 9154 | 9321 | 9241 | 0.668 | 0.680 | 0.674 |
| Atizapán | 10711 | 11510 | 12231 | 0.781 | 0.840 | 0.892 |
| Calimaya | 46813 | 50615 | 54228 | 3.417 | 3.694 | 3.958 |
| Capulhuac | 36079 | 38395 | 40519 | 2.63 | 2.802 | 2.957 |
| Chapultepec | 8735 | 9820 | 10880 | 0.637 | 0.716 | 0.794 |
| Jalatlaco | 23310 | 24773 | 26122 | 1.701 | 1.808 | 1.906 |
| Lerma** | 121696 | 128395 | 134258 | 8.883 | 9.372 | 9.800 |
| Metepec** | 228758 | 237110 | 243761 | 16.699 | 17.309 | 17.794 |
| Ocoyoacac | 64834 | 69716 | 74299 | 4.732 | 5.089 | 5.423 |
| Otzolotepec | 91017 | 103033 | 114966 | 6.644 | 7.521 | 8.392 |
| Rayón | 15173 | 17397 | 19641 | 1.107 | 1.269 | 1.433 |
| S. A. la Isla | 13626 | 14715 | 15757 | 0.994 | 1.074 | 1.150 |
| S. M. Atenco | 83299 | 91404 | 99194 | 6.080 | 6.672 | 7.241 |
| Temoaya | 98684 | 109173 | 119500 | 7.203 | 7.969 | 8.723 |
| Texcalyacac * | 5918 | 6606 | 7266 | 0.432 | 0.482 | 0.530 |
| Tianguiستenco | 80479 | 88323 | 95899 | 5.874 | 6.447 | 7.000 |
| Toluca ** | 915978 | 993801 | 1065131 | 66.866 | 72.547 | 77.754 |
| Xonacatlán | 53119 | 56485 | 59461 | 3.877 | 4.123 | 4.340 |
| Zinacantepec** | 169909 | 185100 | 200815 | 12.403 | 13.512 | 14.659 |
| Total | 2077292 | 2245692 | 2403169 | 151.64 | 163.93 | 175.43 |

Fuente: elaboración propia

Capítulo VI

Conclusiones

Como ya se mencionó en los capítulos anteriores se trabajó bajo dos metodologías para estimar la recarga. En el primer método (balance hídrico tradicional) éste se trabajó bajo los lineamientos que enmarca la Norma Oficial Mexicana (NOM-011-CNA-2000) y la segunda técnica (balance hidrometeorológico) el método se desarrolló bajo distintas herramientas en un Sistema de Información Geográfica .

Hacer la estimación de la recarga bajo un balance tradicional tal y como lo establece la norma no precisa el valor de la recarga, ya que la generalidad de los datos limita el análisis de los datos y los resultados obtenidos pueden variar considerablemente. Del resultado del balance hídrico en base a datos históricos, se pudo constatar que la evapotranspiración real estimada mediante la fórmula empírica de Turc sumados a los valores del escurrimiento excede los valores de la precipitación, por tal motivo es recomendable interactuar con otros métodos que permitan ajustar la fórmula empírica. Con el ajuste a la fórmula empírica de Turc los resultados de recarga pueden ser más alentadores, ya que en muchas investigaciones en torno al tema, los valores de recarga en muchas ocasiones no coinciden con los valores obtenidos.

Por otro lado, la cuantificación de la recarga mediante un balance hidrometeorológico estimado mediante distintas herramientas en un Sistema de Información Geográfica es importante, a razón de la gran cantidad de datos en interacción distribuidos espacial y temporalmente. Una de las variables más difícil de cuantificar en el método es la evapotranspiración real, ya que la ausencia de los datos limita la capacidad de análisis de este parámetro, otro factor muy importante es la falta de tecnología que permita evaluar éste.

Por lo anterior y para fines de comparación se optó por realizar la evaluación de la Evapotranspiración real con imágenes de satélite. Sin embargo, Elegir la fórmula adecuada para estimar la evapotranspiración real es un factor fundamental, que se debe resolver al momento de analizar los datos disponibles porque es fácil confundir el término evapotranspiración potencial y evapotranspiración real; por tanto es recomendable optar por formulas en las que se consideré diversos parámetros, tales como: la radiación solar, el uso del suelo, la cubierta vegetal o también conocido como Índice de Cubierta Vegetal Normalizado (NDVI), porque la vegetación es un componente fundamentas para estimar este parámetro Wang *et al.*, (2007)

En comparación de ambas metodologías, en la estimación de la recarga con el método que establece la Norma Oficial Mexicana es crucial para introducirse al tema de recarga, sin embargo una de las deficiencias que tiene el método es que se trabaja con datos empíricos y la estimación de los componentes de las formulas que se establece en la normatividad se limitan por la disponibilidad de datos. Por el contrario hacer la estimación de la recarga mediante un método hidrometeorológico permitió vislumbrar la distribución espacial y temporal de los parámetros que intervienen en la tasa de recarga. Otra diferencia marcada en éste fue estimar el escurrimiento natural de la cuenca acorde a los cambios del uso del suelo. Por otro lado, estimar la tasa de recarga bajo dos metodologías distintas fue de gran importancia ya que el primer método sirvió de referencia para trabajar y validar los resultados obtenidos del segundo método.

Actualmente se han realizado numerosas investigaciones en la cuenca del valle de Toluca en torno a la tasa de recarga, éstos han variado espacial y temporalmente. De acuerdo a la metodología empleada para estimar la recarga, el lineamiento que se tiene en el marco de la presente investigación, los resultados son similares a los obtenidos en investigaciones previas. Estos se sitúan dentro de los rangos de los valores obtenidos en estudios previos. En el año de 1985 se obtuvo un valor de recarga de 302.1 Hm^3 valor similar al obtenido por la empresa ICATEC en el mismo año, en 1996 el valor de recarga osciló en 258.3 Hm^3 resultado afín al estudio realizado por Ariel y consultores en el mismo, en el 2009 Calderhead cuantificó la recarga del acuífero mediante el modelo HELP, modelo que permite la interacción de diversas variables obteniendo así una recarga promedio de 376.2 Hm^3 , en la presente investigación se obtuvo un valor promedio de recarga de 302.1 Hm^3 , resultado muy inferior al obtenido en la investigación del 2009 y finalmente en el 2010 Ortiz-Madrid cuantificó una tasa de recarga de 375.6 Hm^3 , del cual 58.87 Hm^3 , corresponden a una tasa de recarga por cuerpos de agua y el resto corresponde a la recarga por precipitación (318.65 Hm^3).

Es importante resaltar, los resultados obtenidos en torno a las zonas en las que ocurre con mayor frecuencia la recarga son similares a los resultados obtenidos en la investigación de Calderhead (2009) y Ortiz-Madrid (2010) sin embargo una de las ventajas que se tiene en la presente investigación es la interacción de los factores espaciales y temporales del crecimiento urbano y la deforestación.

Otro factor importante que fue de gran importancia en la estimación fue el cambio en el uso del suelo, es decir, las propiedades y las características del suelo tienen un papel fundamental en la tasa de infiltración. Estimar la recarga bajo cambios temporales por deforestación e incremento de la superficie urbana es muy significativo, a razón que en la cuenca constantemente el suelo está sufriendo modificaciones en su entorno natural. El agua que se infiltra depende principalmente de los usos del suelo, así como de la permeabilidad del terreno. Hacer la cuantificación de la recarga es un factor fundamental ya que más de un millón de habitantes asentados dentro y en los límites de la cuenca sacian sus necesidades hídricas del agua subterránea.

El crecimiento urbano, en las últimas 3 décadas se ha triplicado dentro de la zona de estudio, este fenómeno ha crecido principalmente en zonas agrícolas. Sin embargo, este crecimiento no interfiere directamente en la tasa recarga, ya que ésta ocurre con mayor frecuencia en las zonas montañosa que limita la cuenca. Por otro lado, el crecimiento si impacta directamente en la tasa de escurrimiento superficial, esto es porque se cubre el suelo desnudo con una cubierta de asfalto que favorece el escurrimiento del agua precipitada

Por otro lado, en las figuras de proyección del cambio de uso del suelo, se puede prever que la zona metropolitana de la ciudad de Toluca puede tender su crecimiento urbano hacia la zona metropolitana de la ciudad impactando las zonas rurales que limitan la cuenca, asimismo en la proyección del uso del suelo se puede prever que la agricultura presenta tendencias de suplir el suelo boscoso.

Por tanto, la vegetación tiene un papel fundamental en la tasa de recarga, ya que en estas zonas es en donde ocurre la mayor tasa de infiltración del agua de precipitación. Tan solo en el año de 1985 el uso del suelo que más predominada dentro de la cuenca era el bosque, posteriormente este sufrió alteraciones a su entorno natural y disminuyó su capa forestal en un 21%. Las pérdidas del suelo boscosos ha servido para incrementar el suelo agrícola y el pastizal. Es importante resaltar; actualmente se han hecho campañas de reforestación, sin embargo, una de las tendencias es sustituir el árbol nativo de la zona por plantaciones de pinos, situación que altera las condiciones naturales del bosque y de la tasa de recarga.

Por otro lado, de seguir el incremento de la mancha urbana y la desaparición de los bosques como hasta hoy en día ha sucedido, el acuífero se verá más limitado en cuanto al agua que de él se pueda extraer y/o recargar. De seguir con la tendencia de extracción de agua como hasta estos días ha sucedido puede ocurrir lo que actualmente acontece el acuífero del Distrito Federal; disminuirá la tasa de recarga y será necesario extraer agua de cuencas adyacentes al acuífero, causando así un gran desequilibrio ecológico a otras cuencas y por consiguiente se incrementaran los costos monetarios en la extracción y distribución del líquido.

De continuar la tendencia actual del crecimiento urbano, la deforestación y el consumo excesivo de agua potable la población seguirá presentando problemas de estrés hídrico. Detener el crecimiento demográfico es una tarea difícil, lo conveniente es que la población retome la relación hombre-naturaleza de antaño, es decir, es importante hacer uso de los recursos naturales sin agotar la capacidad de restauración de los mismos. En los próximos años se prevé que el agua no solo será sinónimo de vida, también será el nuevo petróleo azul, siendo este el motivo de los conflictos por el recurso. Por esta razón es necesario realizar acciones encaminadas a la restauración y conservación del recurso hídricos, por ello es indispensable la cuantificación de la recarga con parámetros que permitan precisar la tasa de recarga.

No se debe olvidar, que los ecosistemas se encuentran íntimamente ligados a los diferentes usos del suelo, un ejemplo son los bosques, en este ecosistema se presenta la mayor tasa de recarga. En especial, los cambios del uso del suelo y la cubierta vegetal que generan grandes impactos en el flujo de recarga. Es importante resaltar, la cantidad de agua subterránea disponible no debe ser medida en volumen, sino en su tasa de renovación. Si se aprecia el acuífero del mismo modo que se aprecia el agua superficial la conservación del líquido incrementaría considerablemente y los usos excesivos disminuirían, situación, que permitiría la renovación constante del acuífero. A pesar de que el agua subterránea es una alternativa factible para suministrar agua a zonas urbanas, es necesario poner especial atención en las zonas degradadas y sobreexplotadas del acuífero, siendo estas zonas las más vulnerables a la contaminación y a la pérdida de la capacidad de infiltración.

Recomendaciones

Es pertinente continuar con la presente investigación ya que es fundamental estimar la recarga para su correcta gestión en las políticas públicas, para ello es necesario incorporar más variables climatológicas, así como las fugas en la red de distribución del agua potable de la ciudad de Toluca y zonas conurbadas, también sería factible incorporar el agua de desecho de las zonas rurales que limitan la cuenca, ya que estas comunidades no tienen servicio de alcantarillado.

Sería factible hacer la cuantificación de la recarga mediante un análisis mas discretizado, es decir eliminar el promedio de la estimación anual, ya que no se precisa la impulsión real del acuífero y trabajar el balance de forma mensual.

Estimar la recarga considerando la época de estiaje y de sequia es fundamental ya que ello, permitirá tener un control sobre la extracción y distribución del recurso hídricos por temporadas. Es importante considerar un balance por cada época debido a que las temporadas de estiaje y de sequia son cada vez más intensos y de cierto modo permitirán incrementar o disminuir la tasa de recarga.

Es necesario hacer una planeación correcta del uso del suelo, en especial del crecimiento urbano, ya que este fenómeno crece de forma desmedida y desordenada en cualquier superficie del terreno, por otra parte sería de vital importancia una ley forestal que promueva la restauración y el cuidado de los bosques.

Es de suma importancia, que la información del Servicio Meteorológico Nacional este actualizado y disponible porque en la información disponible existen muchas deficiencias.

Bibliografía

- Aboites, L (1998)** *El agua de la nación. Una historia política de México (1988-1964)*. Ciudad de México, CIESAS.
- Alcalá, J. (2005)** *Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico*. Tesis Doctoral de la Universidad Politécnica de Catalunya.
- Allen, R.G. Howell, T.A. Pruitt, W.O. Walter, I.A. y Jensen, M.E. (Eds.) (1991)** *Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements. m En: proceedings of the International Symposium on Lysimetry*. American Society of Civil Engineers. New York. 444 pp.
- Antón, Danilo J. Díaz-Delgado, Carlos; editores (2002)** *Sequía en un mundo de agua* (en línea), San José / Toluca, Piriguazú Ediciones / CIRA-UAEM, 2002, 420 p., ilustraciones, cuadros y gráficos (versión digital). © CIRA-UAEM, 2002. ISBN (Piriguazú): 9974-7571-4-2
- Aparicio, F. (2005)** *Fundamentos de hidrología de superficie*, México D.F.:Limusa
- Arreguín, F. (2007)**. *Impacto climático sobre los acuíferos mexicanos, memorias del 6° Congreso Nacional de Aguas Subterráneas*, Puerto Vallarta, Jalisco, México.
- Ávila P. (1996)** *Escasez de agua en una Región indígena. El caso de la meseta Purépecha*, Zamora, Colegio de Michoacán
- Benitez, C. y Quiroz J. (1980)** *Manual de conservación de suelos y agua*. Ministerio de conservación de suelos y agua. Lima, Peru.
- Boehm S. y Sandoval M. (1999)** *“la sed saciada de la ciudad de México y la nueva cuenca Lerma.chapala-Santiago*. “Un ensayo metodológico”

- Bridget R. Scanlon, Healy P. Cook. (2001)** *Chossin appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. Hydrogeology Journal DOI10.1007/s10040-0010176-2
- Brigitte, Bohem, Juarez y Torres (2002)** *Los estudios del agua en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago*
- Burger, S.J. M.S. Wigmosta, and J.M. Meena. (1998)** *Hydrological effects of land-use change in a zero-order catchment*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 3(2), 86-97.
- Burgess, S.S. M.A. Adams, N.C. Turner, D.A. White, and C.K. Ong. (2001)** *Tree roots: conduits for deep recharge of soil water*. *Oecologia*, 126, 158-165.
- Caire Georgina (2005)** “*Conflictos por el agua en la cuenca Lerma-Chapala 1996.2002*”, *Región y sociedad*, vol. *VVII*, núm. 34.
- Calderhead (2009)** *Pumping effects on land subsidence: assessment using field data remote sensing and numerical modeling* Tesis Doctoral Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Québec.
- Carrera Hernández, JJ. Gaskin (2008)** *spatio-temporal abalysis of potential aquifer recharge: aplication to the basin of Mexico*. *Journal of Hidrology* 353, 228-246
- Carrica, J. y Lexow, C. (2004)** *Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires*. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (2), 281-290.
- Carrillo J. (2006)**. *Uso del agua en México: ¿ha sido congruente la forma de medición y asignación del agua con el estado de avance metodológico mundial?* Reporte, Instituto de Geografía, UNAM. CU, México DF, 22 de agosto del 2006.
- CLICOM. (2009)** *Limating Computing Program, Base de Datos Meteorológicos*. México: *Servicio Meteorológico Nacional*.
- Comisión Nacional del Agua (1997)** *Sistema Cutzamala, agua para millones de ciudadanos*. México D.F.
- Comisión Nacional del Agua (2000)** *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, “conservación del recurso agua - que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”*. Diario Oficial de la Federación. 17 de abril de 2002. México.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2009).** *Actualización de la disponibilidad media anual del agua subterránea en el acuífero del Valle de Toluca*, Estado de México. México D.F. Comisión Nacional del Agua.
- Comisión Nacional del Agua (Conagua) y la Secretaría de Medio ambiente y recursos naturales (Semarnat, Marzo-2011,** *Estadísticas del agua en México, edición 2011.* WWW. CONAGUA.GOB.MX. consultado el 18 de enero del 2012
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).** 1999. *Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO.* Portal de Geoinformación, <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Consejo Nacional de Proyecciones (CONAPO; 2011)** <http://www.conapo.gob.mx/>
- Constantz, J. Thomas, C.L. y Zellweger, G. (1994)** *Influence of diurnal variations in stream temperature on streamflow loss and groundwater recharge.* *Water Resources Res.* 30: 3253-3264.
- Cruse, R.M. and Gupta, S.C. (1991)** *Soil compaction mechanisms and their control.* In: Lal, R. and Pierce, F.J. (eds) *Soil Management for Sustainability.* Soil and Water Conservation Society, Iowa, pp. 19–24.
- Custodio G.E. (1997)** *Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos.* In: *Evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación Hidrológica*, IGEM y IAH Grupo Español, las palmas de gran canaria, Madrid (1997), pp 83-110.
- Custodio G.E. (1998)** *Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre.* Boletín geológico y minero. 109(4). 13-29
- Delgado-Ramos, J. C. (2006)** *Agua: usos y abusos, la hidroeléctrica en Mesoamérica.* D® Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades, Universidad Autónoma del Estado de México. ISBN 970-32-3168-3
- Diez, Pérez (2009)** *Alternativas de administración racional de recursos hídricos en un acuífero sometido a sobreexplotación: Valle de Toluca, Estado de México.* Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano del Recurso Agua (CIRA-UAEM)
- Dunker, R.E., Hooks, C.L. Vance, S.L. and Darmody, R.G. (1995)** *Deep tillage effects on compacted surfacemined land.* *Soil Science Society of America Journal* 59, 192–199.
- Duran Juarez, Partida-Rocha, Torres-Rodríguez. (1999)** “*Cuencas hidrológicas y ejes industriales: el caso de la cuenca Lerma –Chapala-Santiago*”, 80:99-121.

- Eastman, J.R (2009)** *Guía para el Sistema de Información Geográfica y procesamiento de imágenes*. Clark University
- Esteller, M. V. and Andreu, J. M. (2005).** *Antropic effect on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico)*. Hydrogeology Journal. Vol. 13, núm. 2, mayo, pp.378-390.
- Esteller, M. V., Quentin, E., y Díaz-Delgado, C. (2002)** *Uso de Sistemas de Información geográfica (SIG) para la determinación de parámetros utilizados en la construcción de mapas de vulnerabilidad de acuíferos*. *Revista Latinoamericana de Hidrogeología*, 17-30.
- FAO (Food and Agriculture Organization) (2001a)** *The State of Food Insecurity in the World*. Food and Agricultural Organization, Rome.
- Flury, M., Fluhler, H., Jury, W.A. y Leuenberger, J. (1994)** *Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study*. *Water Res. Research*. 30: 1945-1954.
- Foster, D.S. (2001)** *The interdependence of groundwater and urbanization in rapidly developing cities*, urban water 3185-192.
- Franco P.R (2008)** *Concepción e implementación de un módulo hidrogeomático para la evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico*. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano del Recurso Agua (CIRA-UAEM)
- Franco, P. R (2002)** *Adecuación del método de evaluación de vulnerabilidad de acuíferos (DRASTIC), mediante el uso de trazadores de partículas en el acuífero del curso alto del río Lerma, Estado de México*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. Centro interamericano de Recursos del Agua (CIRA-UAEM).
- Gárfias J., Bivian, L., y Llanos H. (2008)** *Uso Racional y Sostenible de los Recursos Hídricos del Valle de Toluca*. *Ciencia Ergo Sum*, 15 (001), 61-72.
- Garfías J., Franco R., y Llanos H. (2002)** *Análisis de la vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero del curso alto del Río Lerma, Estado de México*. *Revista Latino-Americana de Hidogeología* (2), 115-126.
- Garrido Schneider E. y Arcón González de Aguilar. (2008)** *Problemática asociada a la explotación de las aguas subterráneas en el casco urbano de Zaragoza*.

- Giráldez, J.V. y López-Rodríguez, J.J. (1997).** *Evaluación de la recarga derivada de acciones antrópicas: regadíos, canales y construcciones, embalses y depósitos.* En: *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica.* (Eds.: Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J.). IGME y AIH. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid. 141-152.
- Gogu, R.C., G. Carabin, V. Hallet, V. Peters, and A. Dassargues. (2001)** *GIS-based hydrological databases and groundwater modelling.* Hydrogeology Journal, 9, 555-569.
- Goodchild, M.F., B.O. Parks, and L.T. Steyaert. (eds.) (1993)** *Environmental modelling with GIS.* Oxford University Press, New York.
- Goslee, SC. Brooks RP. Cole CA. (1997)** *Plants as indicators of wetland water source,* plant Ecology 131,199-206
- GTZ, (2008)** *Plan de manejo de la cuenca de Río Lerma en el Valle de Toluca.* Informe final, México 2008.
- Guerra Cobián, V. H. (2007)** *Análisis del efecto de discretización espacial en el modelado de cuencas hidrológicas utilizando el modelo distribuido CEQUEAU-ONU.* Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México, CIRA, Toluca México.
- Hall, M.J. (1984)** *Urban Hydrology.* Elsevier Applied Science, London.
- Izquierdo, T. y A. Márquez .(2006)** *Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias).* Geogaceta 40: 307-310.
- Jeffries MJ, Mills DH. (1990)** *Freshwater Ecology: Principles and applications.* London: Belhaven Press.
- Jyrkama Ilmary Mikko (2003)** *A methodology for estimating groundwater recharge.* A thesis presented to the University of Waterloo for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering.
- Jyrkama M. Sykes J. Normani S. (2001)** *Recharge estimation for transient groundwater modeling .*Groundwater no. 40 no 6:638-645.
- Köppen y García. (1981).** *Atlas Nacional del Medio Físico, SPP.3*
- Kumar C.P. (1993)** *Estimation of Ground Water Recharge due to rainfall by Modeling of Soil Moisture movement.* National Institute of Hydrology, Technical Report N° TR-142,1992-93,55P

- Lafragua J. Gutiérrez A. Aguilar E. Aparicio J. Mejía R. Santillán O. Suárez MA. Preciado M. (2003)** Balance Hídrico del Valle de México. Anuario IMTA.
- Le Maitre, D.C., D.F. Scott, and C. Colvin. (1999)** *A review of information on interactions between vegetation and groundwater.* Water South Africa, 25(2), 137-152.
- Lerner D. N (1997)** *Groundwater Recharge in: Seather OM, de capital P (eds) Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments.* AA Balkema, Rotterdam, pp 109-150.
- Lerner D. N . Issar A.S. Simmers I. (1990)** *Groundwater Recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge.* International Association of Hydrogeologists, Kenilworth, Rep 8,345pp.
- Lerner, D.N. (2002)** *Identifying and quantifying urban recharge: a review.* Hydrogeology Journal, 10,143-152.
- Maderey, E, y Jiménez, R (1995)** “*Aplicación de un modelo climatológico para conocer la disponibilidad de agua en cuencas de clima húmedo en la República Mexicana*”, en México ante el Cambio Climático. Segundo Taller de Estudio de País: México, Cuernavaca, Morelos, México. pp. 159-164.
- Magaña Rueda Víctor (Editor) (2004).** Los impactos del niño en México. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación. México, 229 p.
- Martínez D. Bocanegra E. Massone H. (2002)** *Estimación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del Arroyo Napostá Grande, Argentina.* Groundwater and human Development. ISBN -987-544-063-9.
- Miller, W.P. and Radcliffe, D.E. (1992)** Soil crusting in the southeastern U.S. In: Summer, M.E. and Stewart, B.A. (eds) *Soil Crusting: Chemical and Physical Process.* Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 233–266.
- Mintegui Aguirre JA. y López Unzu F. (1990)** *La ordenación agrohidrológica en la planificación. Servicio Central de publicaciones del país Vasco Victoria.* 306 pp.
- Murillo-Díaz JM. (2004)** *Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del bajo Guadalquivir.* Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Nabi, G., Mullins, C.E., Montemayor, M.B. and Akhtar, M.S. (2001)** *Germination and emergence of irrigated cotton in Pakistan in relation to sowing depth and physical properties of the seedbed.* Soil Tillage Research 59, 33–44.

- Nishimura, T., Nakano, M. and Miyazaki, T. (1990)** *Effects of crust formation on soil erodibility*. Trans. JSIDRE 146, 101–107 (in Japanese with English abstract).
- Noble, A.D., Gillman, G.P., Nath, S. and Srivastava, R.J. (2001)** *Changes in the surface charge characteristics of degraded soils in the tropics through the addition of beneficiated bentonite*. Journal of Soil Research 39, 991–1001.
- Olaiz Alfonso, Camacho Héctor, Guillomén Enrique, Romero Rabindranath, Sánchez Juan. (2003)**. “*Evaluación económica y valoración social de los escenarios del manejo de agua superficial en la cuenca Lerma-Chapala*”. Anuario IMTA, Jiutepec Morelos.
- Ortíz- Madrid (2010)** *Estimación de la recarga del acuífero del Valle de Toluca mediante la aplicación de herramientas en un Sistema de Información Geográfico (SIG)*,. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano del Recurso Agua (CIRA-UAEM)
- Oussible, M., Crookston, P.K. and Larson, W.E. (1992)** *Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat*. Agronomy Journal 84, 34–38.
- Penning de Vries, F.W.T., Acquay, H., Molden, D., Scherr, S.J., Valentin, C. And Coffie, O. (2003)** *Integrated land and water management for food and environmental security*. Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture Research Report 1. Comprehensive Assessment Secretariat, Colombo, Sri Lanka.
- Peña, F., (2000)** *El agua que no se fue. La disputa del lago del Cuitzeo en Brigitte Bohem, Juan Manuel Juarez y Alicia Torres Rodriguez, los estudios del agua en la cuenca Lerma-Chapala-Santiago*.
- Phillips, F.M., Mattick, J.L. y Duval, T.A. (1988)** *Chlorine 36 and tritium from nuclear weapons fallout as tracers for long-term liquid movement in desert soils*. Water Res. Resources. 24(11): 1877-1891.
- Pulido, B. A., (1979)** *Contribución al Conocimiento de la hidrogeología del prebético nororiental (provincias de Valencia y Alicante)* Servicio Publicaciones Ministerio de Industria. Mem. IGME, 95. 410 p. ISBN 84-7474-050-9.
- Pulido-Bosch, A. (coord) (2005)** *Recarga en la Sierra de Gádor e hidrogeoquímica de los acuíferos del Campo de Dalías*. Almería, Cajamar.
- Pulido-Bosch, A., Pulido-Lebouf, P., Molina, L., Vallejos, A., Molina, L., Martín-Rosales, W. (2000)** “*Intensive agriculture, wetlands, quarries and water*

management. A case study (Campo de Dalías, SE Spain)”, *Environmental Geology*, 40(1-2), 163-168.

Sahuquillo, A. (1997) *Evaluación de la recarga de acuíferos en abanicos aluviales, torrentes, piedemontes y cauces efímeros*. En: *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. (Eds.: Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J.). IGME y AIH. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid. 125-139.

Samper, J. (1997a) *Métodos de evaluación de la recarga por la lluvia por balance de agua: utilización, calibración y errores*. En: *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. (Eds.: Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J.). IGME y AIH. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid. 41-81.

Samper, J. (1997b) *Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos*. En: *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. (Eds.: Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J.). IGME y AIH. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid. 153-180.

Samper, J. y García-Vera, M.A. (1997) *Estimación de la recarga producida por la lluvia y los excedentes de riego mediante balances diarios de agua en el suelo: experiencias en diferentes zonas climáticas*. En: *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. (Eds.: Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J.). IGME y AIH. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid. 367-379.

Samper, J. y Guimerà. J. (1991) *Interpretación numérica de un ensayo de trazador químico para el estudio de la recarga en el acuífero del Parque Nacional de Doñana*. En: *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas*. En: *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas*. Teoría, medición y modelos. (Eds.: Candela, L. y Varela, M.). CINME. Barcelona. 277-302.

Scalon, B. R., I. D. Jolly, M. Sophocleous, and L. Zhang. (2006) *Global impacts of agricultural land-use changes on water resources: quantity versus quality*. *Water Resources Research*.

Scalon, B.R., Healy, R.W. and Cook, P.G.,(2002) *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. *Hydrogeology Journal*, 10: 18-39.

Schneider., T. (2001). *Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values*, *Journal of Climate*, 14, (5): 853-871.

Silva, R. (2006). *El Sistema Lerma o El Triunfo de la Hidrofobia*. Agua y subordinación en la cuenca del río Lerma. Capítulo IV. UAEM.

- Simmers I. (1998)** *Groundwater recharge: an overview of estimation “problems” and recent developments*. Geological society, London, Spatial Publications, 130,107-115
- Singh, V.P., and M. Fiorentino. (eds.) (1996).** *Geographical information systems in hydrology*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Solé, J., Carrera, J. y Galarza, G. (1995)** *Modelos de evapotranspiración potencial:Revisión y propuesta de clasificación. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. 19:19-30.
- Sophocleous M (2002)** *Interactions between groundwater and surface water: the state of the science*. Hydrogeol J (in press). DOI 10.1001/s10040010170-8.
- Stocking, M. (1994)** *Soil erosion and conservation: a place for soil science? In: Syers, J.K. and Rimmer, D.L. (eds) Soil Science and Sustainable Land Management in the Tropics. CAB International, Wallingford, UK, pp. 40–58.*
- Vargas Sergio Mollard Eric, y Phillipus Wester (2005)** *Comprehensive Assessment of water management in agriculture. Comparative study on river basin development and management: the Lerma Chapala basin, México*, International water management. Institute Universidad de Wageningen.
- Vargas Sergio, Eric Mollard, Rabindranath Romero y Murillo D. (2004).***Evaluación social de los escenarios de manejo de agua superficial en la cuenca Lerma-Chapala*. Proyecto CP0322, IMTA.
- Verbyla,D.L. (2002)** *Practical GIS analysis* Taylor & Francis, London 288 pp.
- Vilchis-Francés, A. Y. (2007)** *Evaluación y optimización de la red de estaciones climatológicas en el Estado de México*. Tesis de Maestría. CIRA-UAEM.
- Wang K., Wang P. Li Z. Cribb M. Sparrow M. (2007)** *A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature*. Journal of Geophysical. 1029/2006JD008351.
- Weibell, R. and Heller M. (1991)** *Digital Terrain Modeling. Systems: principles and applications*, 269-197.
- Wood, W.W. y Sanford, W.E. (1995)** *Chemical and isotopic methods for quantifying ground-water recharge in a regional, semi-arid environment*. Ground Water. 33(3). 458-468.
- WRI (World Resources Institute) (2003)** *Watersheds of the World*. Water Resources Atlas. IUCN, IWMI, Ramsar Convention Bureau and WRI, Washington, USA.

Xiong, X., Chiang K., Sun, J., Barnes, W.L., Guenther B., Salomonson V.V. (2009) *NASA EOS Terra and Aqua MODIS on-orbit performance.* *Advances in Space Research* 43 (3), pp. 413-422.

Yang, Y., D.N. Lerner, M.H. Barrett, and J.H. Tellam (1999). *Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK.* *Environmental Geology*, 38(3), 183-198.