



Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Facultad de Ingeniería  
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

## Análisis multitemporal del uso y aprovechamiento del agua en el Valle de San Luis Potosí

### T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. María Florencia López Núñez

Asesor:

Dr. Abraham Cárdenas Tristán

San Luis Potosí, S. L. P.

Octubre de 2018





## Agradecimientos

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento a mi director de tesis el Dr. Abraham Cárdenas Tristán por todo el apoyo, consejos y motivación que me dio durante mi estancia en la maestría. Al Dr. Hilario Charcas y al Dr. Marcos Algara Siller por compartir sus conocimientos, y la orientación que me dieron durante cada etapa de esta investigación.

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, mi alma mater por brindarme la oportunidad de incorporarme nuevamente a sus filas, ahora siendo estudiante de la maestría en Tecnología y Gestión del Agua.

A mis compañeros Carlos, Daniel, Fabricio, Karla, Raúl, y Nancy les agradezco infinitamente por cada uno de los momentos que compartimos durante esta etapa. Especialmente te agradezco Paty, por ser la persona que me acompañó en todo momento, gracias por tu paciencia, comprensión y solidaridad.

A mi amada familia y amigos por ser parte fundamental de mi vida.

.

## Resumen

El agua se encuentra presente en cada uno de los aspectos de la vida en la Tierra, sustentando la vida humana, animal y vegetal contribuyendo a la sostenibilidad de los ecosistemas. Suministra los servicios vitales para la salud humana, así como los medios de subsistencia y bienestar (UNESCO, 2016). El objetivo de este trabajo es generar un modelo de distribución espacial para el valle de San Luis Potosí, que permita comprender sobre el uso y aprovechamiento del recurso hídrico a través de las últimas tres décadas y que sea una herramienta que contribuya a la adecuada gestión del agua en la región. Mediante el índice del uso y aprovechamiento del agua y de las tecnologías geoespaciales (SIG, percepción remota y geoestadística), se conocerán los patrones de comportamiento que inciden en los diferentes usos y consumos del agua a través del tiempo como la evapotranspiración, los usos comerciales y de servicios catalogados por el PIB, el uso de suelo y los servicios ambientales para estimar usos y aprovechamientos ecológicos y económicos, mismos que se integran para la generación de un modelo de distribución espacial. Así mismo, se estimó el modelo de distribución espacial para el año 2050, con base a la metodología de ARIMA con la finalidad de examinar el comportamiento del recurso hídrico en las próximas décadas. Adicionalmente, se realizó un análisis histórico de los aprovechamientos subterráneos en el valle de San Luis Potosí, considerando que los cuerpos subterráneos son la principal fuente de abastecimiento de agua. Finalmente se obtuvo una perspectiva general del manejo del agua en sectores sociales, económicos y ecológicos de las últimas tres décadas.

## Abstract

Water is present in every aspect of life on Earth, sustaining human, animal and plant life contributing to the sustainability of ecosystems. It provides the vital services for human health, as well as the means of subsistence and well-being (UNESCO, 2016). The objective of this work is to generate a model of spatial distribution for the San Luis Potosí Valley, which allows understanding about the use and utilization of water resources through the last three decades and that is a tool that contributes to the proper management of water resources. water in the region. Through the index of the use and use of water and geospatial technologies (GIS, remote sensing and geostatistics), the behavior patterns that affect the different uses and consumptions of water over time, such as evapotranspiration, commercial uses, will be known. and services cataloged by GDP, land use and environmental services to estimate ecological and economic uses and uses, which are integrated for the generation of a spatial distribution model. Likewise, the spatial distribution model was estimated for the year 2050, based on the ARIMA methodology with the purpose of examining the behavior of the water resource in the coming decades. Additionally, a historical analysis of the underground uses in the San Luis Potosí valley was carried out, considering that the underground bodies are the main source of water supply. Finally, a general perspective of water management in social, economic and ecological sectors of the last three decades was obtained.

## Índice

Antecedentes.....	3
Problemática.....	7
Estado del arte de la problemática: Necesidad de métodos de modelación geoespacial-temporal a nivel internacional y nacional.....	8
Estado del arte de la problemática: Metodologías de distribución espacial en el manejo del agua a nivel internacional y nacional.....	12
Hipótesis.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.....	15
Metodología.....	16
Sinopsis.....	19
<b>Capítulo 1. Definición y características de la cuenca en la zona de estudio.....</b>	<b>20</b>
1.1. Área de estudio.....	20
1.2. Características de la cuenca en la zona de estudio.....	21
1.3. Estudios precedentes sobre la zona de estudio y caracterización geomorfológica de la cuenca.....	22
1.4. Uso de tecnologías geoespaciales para delimitar y representar a la cuenca de la zona de estudio.....	25
1.4.1. Procesos en SIATL.....	25
1.4.2. Procesos en Arc Hydro.....	26
1.4.3. Otras tecnologías geoespaciales.....	26
1.5. Representación de la cuenca, sus drenajes principales y escurrimientos.....	28
1.6. Conclusión.....	33
1.7. Bibliografía.....	34
<b>Capítulo 2. Análisis multitemporal con el uso de imágenes satelitales y procesos geoestadísticos.....</b>	<b>37</b>
2.1. Caracterización de imágenes de satélite de resolución espacial de 30 metros de diversos periodos en las últimas tres décadas.....	37
2.2. Integración de juegos de datos meteorológicos de las últimas tres décadas.....	38
2.3. Proceso de correcciones radiométricas y atmosféricas a las imágenes de satélite.....	39
2.4. Método geoestadístico como herramienta de análisis espacial a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	41
2.5. Modelos de interpolación espacial.....	41
2.6. Conclusión.....	43
2.7. Bibliografía.....	44

<b>Capítulo 3. Modelo de distribución espacial para el uso y aprovechamiento del agua</b>	<b>46</b>
3.1. Determinación de variables y parámetros	46
3.2. Determinación del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)	47
3.2.1. Análisis del NDWI de los diferentes periodos de estudio (Lluvias-Secas)	47
3.3. Cálculo de la evapotranspiración para el valle de San Luis Potosí en los diversos periodos determinados	55
3.3.1. Análisis de la presencia de evapotranspiración en los diferentes periodos de estudio	59
3.4. Proceso de clasificación supervisada al conjunto de datos vectoriales y matriciales de la cartografía del uso de suelo	63
3.4.1. Análisis de la clasificación de uso de suelo en los diferentes periodos de estudio	63
3.5. Análisis de la distribución espacial de las actividades económicas para determinar el Producto Interno Bruto (PIB)	67
3.5.1. Análisis de la distribución del PIB en los diferentes periodos de estudio	70
3.6. Análisis de la distribución espacial de los usos de agua para servicios ambientales	75
3.6.1. Análisis de los valores de servicios ambientales en los diferentes periodos de estudio	76
3.7. Distribución espacial del Uso y Aprovechamiento del Agua (UAA)	80
3.7.1. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico ( <b>UAAecológico</b> )	81
3.7.2. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico ( <b>UAAeconómico</b> )	85
3.8. Modelo de distribución espacial para uso y aprovechamiento del agua	89
3.8.1. de la serie de <b>UAAecológico</b> a través de la metodología de ARIMA	91
3.8.2. Resultados de la serie de <b>UAAeconómico</b> a través de la metodología de ARIMA	95
3.9. Conclusión	102
3.10. Bibliografía	103
<b>Capítulo 4. Análisis histórico de los aprovechamientos subterráneos en el Valle de San Luis Potosí</b>	<b>105</b>
4.1. Situación actual de la explotación del acuífero de San Luis Potosí	105
4.2. Dinámica de los aprovechamientos subterráneos en las últimas tres décadas	107
4.3. Principales usos y aprovechamientos del agua en el valle de San Luis Potosí	112
4.4. Conclusión	114
Conclusiones	112
Referencias	115

## Lista de Figura

Figura 1. Esquema de la metodología utilizada. ....	18
Figura 2. Localización del área de estudio. ....	20
Figura 3. Subcuencas presentes en el área de estudio. ....	23
Figura 4. Subcuenca Presa San José, cauce principal y escurrimientos. ....	29
Figura 5. Subcuenca Presa San Pablo, cauce principal y escurrimientos. ....	30
Figura 6. Subcuenca Rio Santa María Alto, cauce principal y escurrimientos. ....	31
Figura 7. Modelo Tridimensional de la cuenca, sus drenajes y escurrimientos. ....	32
Figura 8. Estaciones meteorológicas en el valle de San Luis Potosí. ....	38
Figura 9. Esquema de la integración de las variables en el modelo de distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua ecológico y económico. ....	46
Figura 10. NDWI para época de lluvia, 1990. ....	49
Figura 11. NDWI para época de lluvia, 1995. ....	49
Figura 12. NDWI para época de lluvia, 2000. ....	50
Figura 13. NDWI para época de lluvia, 2005. ....	50
Figura 14. NDWI para época de lluvia, 2009. ....	51
Figura 15. NDWI para época de lluvia, 2015. ....	51
Figura 16. NDWI época de seca, 1990. ....	52
Figura 17. NDWI época de secas, 1995. ....	53
Figura 18. NDWI época de secas, 2000. ....	53
Figura 19. NDWI época de secas, 2005. ....	54
Figura 20. NDWI época de secas, 2009. ....	54
Figura 21. NDWI época de secas, 2015. ....	55
Figura 22. Evapotranspiración 1990. ....	60
Figura 23. Evapotranspiración 1995. ....	60
Figura 24. Evapotranspiración 2000. ....	61
Figura 25. Evapotranspiración 2005. ....	61
Figura 26. Evapotranspiración 2009. ....	62
Figura 27. Evapotranspiración 2015. ....	62
Figura 28. Uso del suelo 1990. ....	64
Figura 29. Uso del suelo 1995. ....	65
Figura 30. Uso del suelo 2000. ....	65
Figura 31. Uso del suelo 2005. ....	66
Figura 32. Uso del suelo 2009. ....	66
Figura 33. Usos del suelo 2015. ....	67
Figura 34. Producto Interno Bruto 1990. ....	72
Figura 35. Producto Interno Bruto 1995. ....	73

Figura 36. Producto Interno Bruto 2000. ....	73
Figura 37. Producto Interno Bruto 2005 .....	74
Figura 38. Producto Interno Bruto 2009. ....	74
Figura 39. Producto Interno Bruto 2015. ....	75
Figura 40. Servicios Ambientales 1990 .....	77
Figura 41. Servicios Ambientales 1995. ....	78
Figura 42. Servicios Ambientales 2000. ....	78
Figura 43. Servicios Ambientales 2005. ....	79
Figura 44. Servicios Ambientales 2009. ....	79
Figura 45. Servicios Ambientales 2015. ....	80
Figura 46. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 1990.....	82
Figura 47. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 1995.....	82
Figura 48. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2000.....	83
Figura 49. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2005.....	83
Figura 50. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2009.....	84
Figura 51. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2015.....	84
Figura 52. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 1990.....	86
Figura 53. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 1995.....	86
Figura 54. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2000.....	87
Figura 55. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2005.....	87
Figura 56. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2009.....	88
Figura 57. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2015.....	88
Figura 58. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2050.....	100
Figura 59. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2050.....	101
Figura 60. Acuífero San Luis, clave 24111.....	105
Figura 61. Censo de los aprovechamientos subterráneos y profundidades en el valle de San Luis Potosí.....	108
Figura 62. Censo de los aprovechamientos subterráneos y gastos en el valle de San Luis Potosí .....	109
Figura 63. Nivel Piezométrico de los aprovechamientos subterráneos del periodo de 1995 a 2007. ....	110
Figura 64. Aprovechamientos subterráneos actuales en el valle de San Luis Potosí.....	111

## Lista de Tablas

Tabla 1. Grupos de información vectorial que contiene SIATL. ....	25
Tabla 2. Geomorfología de la subcuenca de Presa San José.....	28
Tabla 3. Geomorfología subcuenca San Pablo.....	29
Tabla 4. Geomorfología subcuenca Rio Santa María Alto. ....	30
Tabla 5. Características de las imágenes satelitales descargadas.....	37
Tabla 6. Clasificación del SCIAN de las actividades económicas.....	68
Tabla 7. Producto Interno Bruto histórico para el Estado de San Luis Potosí (INEGI, 2017).....	69
Tabla 8. Volumen de agua destinado a las actividades humanas en el valle de San Luis Potosí. .	76
Tabla 9. Dinámica poblacional en el valle de San Luis Potosí (CONAGUA, 2018).....	106
Tabla 10. Usos y aprovechamientos del agua en el acuífero San Luis Potosí, 24111. ....	113

## Lista de Gráficas

Gráfica 1. Comportamiento del NDWI en las últimas tres décadas en época de lluvias. ....	48
Gráfica 2. Comportamiento del NDWI en las últimas tres décadas en época de secas. ....	52
Gráfica 3. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24024.....	56
Gráfica 4. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24069.....	56
Gráfica 5. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24070.....	57
Gráfica 6. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24111.....	57
Gráfica 7. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24153.....	58
Gráfica 8. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24163.....	58
Gráfica 9. Comportamiento de la evapotranspiración en las últimas tres décadas. ....	59
Gráfica 10. Análisis histórico del uso de suelo en el valle de San Luis Potosí.....	64
Gráfica 11. Crecimiento de las actividades primarias a través de las últimas tres décadas. ....	71
Gráfica 12. Crecimiento de las actividades secundarias a través de las últimas tres décadas. ....	71
Gráfica 13. Crecimiento de las actividades terciarias a través de las últimas tres décadas.....	72
Gráfica 14. Valor de Servicios Ambientales (VSA) en las últimas tres décadas.....	77
Gráfica 15. Uso y Aprovechamiento del agua Ecológico en las últimas tres décadas.....	81
Gráfica 16. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico en las últimas tres décadas.....	85
Gráfica 17. Comportamiento de las series de tiempo de <i>UAAecológico</i> y <i>UAAeconómico</i> . ...	90
Gráfica 18. Estimación del Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico para el año 2050.....	99
Gráfica 19. Estimación del Uso y Aprovechamiento del Agua Económico para el año 2050....	100
Gráfica 20. Distribución del agua extraída de aprovechamientos subterráneos. ....	113
Gráfica 21. Análisis del crecimiento poblacional y los factores ambientales para el valle de San Luis Potosí.....	117

Gráfica 22. Análisis de los valores de servicios ambientales y de los factores ambientales para el valle de San Luis Potosí. .... 117

Gráfica 23. Análisis del PIB y los factores ambientales para el valle de San Luis Potosí..... 118

## Introducción

En la actualidad el recurso hídrico es un tema de gran relevancia para todos los países, debido al crecimiento exponencial de la población que incide en una mayor demanda de servicios. Cerca de una quinta parte de la población mundial (1.200 millones) habita en áreas que enfrentan escasez de agua, y otro cuarto de la población mundial (1.600 millones) enfrenta recortes en el suministro de agua por insuficiencia de infraestructura para abastecerse de agua de los ríos y acuíferos (UNESCO, 2016). Además, la escasez de agua puede empeorar a causa del cambio climático y de otros fenómenos como la acelerada urbanización o el incremento en la intensidad de las actividades agrícolas, afectando así la disponibilidad de los recursos de agua dulce. El deterioro de la calidad del agua la vuelve no apta para el consumo humano, disminuyendo su abundancia y provocando efectos nocivos en la salud de quienes la consuman en esas condiciones. Por estas razones, es de suma importancia la implementación de programas que apunten a la protección del medio ambiente, la conservación de los recursos hídricos y su eficiente gestión.

El índice del Uso y Aprovechamiento del Agua (UAA) evalúa el empleo y los beneficios procedentes del recurso hídrico a través de un sistema ecológico, económico y social. El agua dulce es un recurso vital para la humanidad y está presente en todas sus actividades sociales, económicas y ambientales. Por tal razón, es considerado como el requisito indispensable para la existencia de vida en nuestro planeta, siendo un factor que influye en el desarrollo social y tecnológico, y que es esencial para el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UNESCO, 2016).

Con el fin de preservar los recursos hídricos es que se lleva a cabo la cumbre mundial de desarrollo sostenible en la que se originan las primeras iniciativas en relación a la gestión del agua, reconociendo la necesidad de estandarizar el manejo, uso y distribución del agua (Lorreyens, 2018). Global Water Partnership (2000) definió a la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) como “un proceso que promueve la gestión y el desarrollo coordinados del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales”.

A nivel internacional se han establecido diversos programas para dar solución a la problemática del agua, tal es el caso del Programa Hidrológico Internacional (PHI) perteneciente a la UNESCO. El PHI contribuye de forma significativa a la comprensión, gestión, educación y capacitación en el ámbito del agua, sobre todo a países en vías de desarrollo a través instrumentos que permiten mejorar la gobernanza, planeación y uso eficiente de los recursos hídricos.

Para el desarrollo de esta Tesis se eligió el valle de San Luis Potosí como zona de estudio con el objetivo de centrar la investigación en una múltiple problemática constituida por diversos factores como: el crecimiento poblacional y económico desmedido en las últimas tres décadas, y que debido a esto, se ha incrementado la demanda hídrica para cubrir las necesidades básicas domésticas, industriales, ganaderas y agrícolas de la región. Sin embargo, la gestión del recurso hídrico se ha llevado a cabo de manera indiscriminada e ineficiente, provocando una serie de conflictos tales como el abatimiento del acuífero, extracción del recurso a mayor profundidad y con esto la disminución de la calidad del agua y la generación de zonas con efectos de subsidencia.

El presente estudio es una adaptación de la metodología empleada por Huang *et al.*, (2014) en la cuenca Tuhai Majia, China, y del trabajo de Tesis de Méndez (2017) que analizó el uso y aprovechamiento del agua en el Estado de San Luis Potosí, a través de un modelo de distribución espacial.

El propósito de la investigación es generar un modelo para el análisis de la distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua para el valle de San Luis Potosí, que permita un manejo adecuado del recurso hídrico en la región. El modelo fue realizado para los periodos de tiempo de 1990, 1995, 2000, 2005, 2009, 2015, 2017 y se requirió de diversas capas de información derivadas de sensores satelitales, datos meteorológico-climáticos y piezométricos, y de cartografía de uso de suelo. De manera que se determinaron una serie de variables relativas al uso de suelo, la evapotranspiración, al producto interno bruto y la relación existente de las actividades productivas, su consumo de agua, y el valor de servicios ambientales que indica la necesidad de recurso hídrico que demandan los ecosistemas. Estas variables se integraron al modelo de distribución espacial obteniéndose un indicador ecológico y económico del requerimiento de agua para el valle de San Luis Potosí. Posteriormente se estimó el comportamiento de ambos indicadores a través de la metodología ARIMA para el año 2050, considerando que esta metodología logra generar predicciones óptimas en plazos cortos, medianos y largos del fenómeno de estudio. Adicionalmente se efectuó un análisis histórico de los aprovechamientos subterráneos, dado que es la fuente principal de suministro de agua para el valle de San Luis Potosí. Por tal razón, lo que se pretende es conocer cómo se ha gestionado el recurso subterráneo en las últimas tres décadas y la relación existente con las variables del modelo de distribución espacial. Este análisis se llevó a cabo a través de factores como la profundidad, los gastos, y los principales usos a los cuales se destinan el agua. Los datos utilizados fueron otorgados por la CONAGUA y se examinaron mediante técnicas geoestadísticas.

## Antecedentes

El agua es un líquido vital proporcionado por la naturaleza y ha sido un factor determinante para la evolución tanto de especies vegetales como animales. El hombre, en su transición de nómada a sedentario procuró siempre establecerse en las inmediaciones de los ríos, manantiales, lagos y otras fuentes donde pudiera proveerse del vital líquido. En la actualidad el agua es considerada como uno de los recursos ambientales que cumple con funciones básicas en el desarrollo de las actividades económicas de consumo y producción. A partir de los últimos 65 años, el crecimiento poblacional a nivel mundial se ha concentrado principalmente en las regiones en desarrollo que se encuentran dentro o cercanas a grandes centros urbanos. La presión de las ciudades sobre el ambiente es importante porque a medida que se agoten los recursos hídricos fácilmente disponibles, las ciudades tendrán que obtener agua a mayores distancias, extraerlas de mayores profundidades, o depender de tecnologías avanzadas para desalinización o reúso de agua (WWAP, 2015).

En el análisis acerca del aprovechamiento del recurso del agua, se han establecido diversas estrategias para conocer, manejar y predecir la demanda que se llega a tener en las grandes urbes. Una de estas estrategias es mediante el conocimiento del Uso y Aprovechamiento del Agua (UAA), el cual es un índice que pondera los beneficios que obtiene un sistema ecológico, económico o social por el consumo de agua, de tal manera que se puede clasificar en tres categorías: uso y aprovechamiento ecológico, uso y aprovechamiento económico, y el uso y aprovechamiento social (Huang, 2013).

Por otro lado, la precipitación pluvial constituye una parte importante del ciclo hidrológico, ya que produce el agua renovable del planeta. Sin embargo, la precipitación pluvial varía de manera regional y estacionalmente dando origen a la distribución y disponibilidad del recurso hídrico. Las regiones más alejadas del ecuador tienden a tener precipitaciones bajas a lo largo del año, mientras que la regiones cercanas al ecuador presentan una temporada intensa de precipitación durante el verano. Por su importancia, la disponibilidad del agua en un área geográfica determinada ha representado el factor decisivo en el establecimiento de nuevas ciudades y centros de desarrollo económico. La disponibilidad de agua se refiere al volumen total de líquido que hay en una región (INEGI, 2017).

La disponibilidad promedio de agua en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km<sup>3</sup>, de los cuales el 97.5% es agua salada y solo el 2.5% es agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra distribuida en glaciares, nieve y hielo (CONAGUA, 2016). Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, solo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o vuelve imposible su utilización efectiva.

Mientras que la población mundial se triplicó en el siglo XX, las extracciones de agua se sextuplicaron, por lo que aumentó el grado de presión sobre los recursos hídricos. El principal uso de recurso hídrico a nivel mundial, conforme a estimaciones de la FAO (2011), es el agrícola con el 70% de la extracción total. Los países con un mayor volumen de extracción de aguas son China e India y son considerados como los países orientales con mayor crecimiento económico y poblacional. Sin embargo, se ven enfrentados a varias problemáticas respecto a cuestiones hídricas, ya que los centros de población están situados en zonas con baja disponibilidad, y por otro lado no existe infraestructura suficiente para proveerles el líquido, aunado a que la calidad del agua es considerada como mala. De manera que los gobiernos de estos países han entendido la problemática a la que se enfrentan y han dedicado grandes esfuerzos en la comprensión del manejo de agua utilizando diversas herramientas. Unas de las herramientas de las que se han apoyado es mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Un SIG es un conjunto de programas informáticos que sirven para captar, almacenar, recuperar, transformar, mostrar y analizar diversos tipos de datos espaciales. (Burrough y McDonnell, 1998 ). Un SIG trabaja con datos georreferenciados con respecto a un sistema de coordenadas espaciales o geográficas, lo que permite que la información generada sea presentada en forma gráfica. Con la generación de cartografía digital específica se puede reconocer la existencia de patrones espaciales sobre algún fenómeno de interés, consiguiendo ser una herramienta útil en la toma de decisiones. Los estudios que se han apoyado de los SIG para el análisis del agua, han centrado su atención al área del consumo y suministro dentro de las grandes urbes, analizando primeramente las condiciones actuales, que involucran la disponibilidad, infraestructura, calidad, población, economía, y proceden a una posterior predicción del fenómeno.

En México el tema del agua es muy complejo desde el punto de vista social, gubernamental, económico y ambiental. Anualmente México recibe aproximadamente 1 449 471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua se estima que el 72.5 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.3% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos (CONAGUA, 2016).

Debido a la condición geográfica y al relieve en México se presentan dos zonas en cuanto a disponibilidad de agua. El 67% del territorio del país es categorizado como árido o semiárido y solo el 33 % del territorio del país es considerado como zonas húmedas. Si bien, la región sur del país es considerada con una alta disponibilidad de agua ya que se manifiestan precipitaciones anuales que superan los 2000 mm por año, sin embargo no todo el territorio mexicano se encuentra en las mismas condiciones, sobre todo en la región norte del país. Es bien sabido que la parte norte es una zona considerada con poca o baja disponibilidad de agua con precipitaciones anuales menores a los 500 mm. Sin embargo, es evidente que las ciudades más pobladas o donde se prevé un crecimiento exponencial es justamente en esta región. De ahí la importancia de establecer acciones o medidas que ayuden a la construcción de un adecuado manejo del recurso del agua. A mediados del siglo XX la población mexicana ha tenido cierta tendencia de emigrar de las zonas rurales hacia las zonas urbanas, se estima que del año de 1950 al 2015 la población del país se cuadruplicó y pasó de ser mayoritariamente rural a predominantemente urbana. La concentración y el crecimiento acelerado de la población en las localidades urbanas han ejercido

una fuerte presión sobre el medio ambiente, derivado del incremento de la demanda de servicios. De hecho de cada 100 litros de agua empleados en México 15 litros son destinados a abastecimiento público, y de esos 15 litros empleados 6 fueron obtenidos por fuentes superficiales y 9 por fuentes subterráneas. En este contexto y para fines de administración y preservación de las aguas nacionales, la CONAGUA ha definido 731 cuencas hidrológicas, las cuencas hidrológicas se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH) y a su vez se agrupan en trece regiones hidrológico-administrativas (RHA). Las cuencas son unidades naturales del terreno, definidas por la existencia de una división de aguas superficiales debido a la conformación del relieve. Por lo tanto, las regiones hidrológicas representan los límites naturales de las grandes cuencas del país.

El uso de las aguas subterráneas en México es primordial, sobre todo para la región norte y noroeste del país, en donde existe un mayor crecimiento poblacional y económico, de manera que el agua que es aprovechada proviene principalmente de pozos y norias. La importancia que presentan las aguas subterráneas radica en el crecimiento socioeconómico del país, debido a que estas presentan características físicas que les permiten ser utilizadas de manera versátil, pues funcionan como presas de almacenamiento y red de distribución, siendo posible extraer agua en cualquier época del año. A partir de la identificación de las zonas de disponibilidad de agua en perfiles superficiales y subterráneos, la CONAGUA se ha encargado de estimar el empleo del agua, en las diversas actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios. Para esto el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) tiene registrados los volúmenes concesionados o asignados a los usuarios nacionales y posee la clasificación de los usos de agua en diversos rubros, dichos rubros son agrupados en usos consuntivos: a) Agrícola 76 %, b) Abastecimiento público 14%, c) Energía eléctrica 5 % y d) Industria autoabastecida 4 %. Por lo tanto, la extracción de agua subterránea es un tema que se ve envuelto en una serie de disputas debido al déficit que están presentando los acuíferos, de hecho en el año 2015 se consideraba que 105 acuíferos presentaban condiciones de sobreexplotación.

El valle de San Luis Potosí se encuentra localizado en la región árida del país, por sus características físicas tiende a sufrir de una menor precipitación, ya que al tener dos barreras naturales como la Sierra de San Miguelito y Sierra de Álvarez disminuyen la probabilidad de una mayor recepción del líquido vital. Siendo entonces la época de verano en donde se produce la mayor cantidad de precipitación al año, por lo cual los cuerpos de agua y corrientes superficiales son muy pocos y dependen justamente de la época de lluvia. En la Figura 1 se muestra la localización y características orográficas del valle de San Luis Potosí. Según Hernández (2015) “los cuerpos de agua que tenían a su disposición los habitantes de la ciudad desde su fundación hasta finales del siglo XIX eran escasas y dependían de la precipitación para mantener un volumen constante”. Durante el siglo XIX el suministro de agua se daba mediante el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales, siendo el río Españita y el río Santiago las fuentes de desarrollo social y económico de la ciudad. Como muestra de la infraestructura generada en esa época para la disponibilidad de agua se creó la emblemática caja del agua, que tenía el objetivo de proveer de agua a la ciudad mediante el acueducto que procedía desde la cañada del lobo, cuerpo de agua ubicado en el sur del municipio de San Luis Potosí.

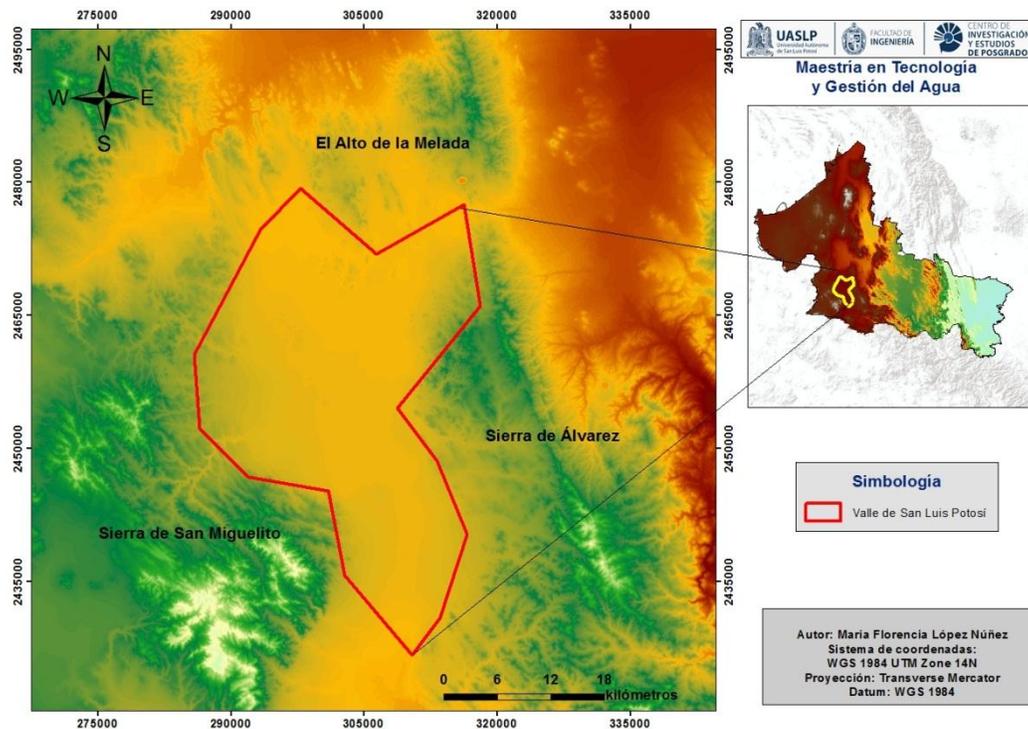


Figura 1. Ubicación del valle de San Luis Potosí.

En la actualidad, el valle de San Luis Potosí obtiene el agua necesaria para su desarrollo en un 84% de fuentes subterráneas y en un 16% de fuentes superficiales. El principal uso que se da al agua dentro del valle de San Luis Potosí es para el consumo urbano que incluye: consumo doméstico, abastecimiento de comercios y servicios públicos. Según INTERAPAS (2013) el acuífero del valle de San Luis Potosí se encuentra sobreexplotado a una proporción de 2 a 1, ya que anualmente se extraen 150 millones de metros cúbicos de agua para uso agrícola, industrial y público. Además el nivel del agua del acuífero desciende entre 1 a 4 metros al año; mientras que las perforaciones de nuevos pozos se construyen a una profundidad de 700 metros, con altos costos de inversión, mantenimiento y operación. Debido a la sobreexplotación del acuífero del valle de San Luis Potosí, se registró que alrededor de 40 pozos tienen presencia de flúor y que rebasan el límite máximo permitido por la norma (INTERAPAS, 2013). Se tiene determinado que el agua que se extrae actualmente del acuífero profundo de San Luis Potosí data de hace más de 1,000 años de antigüedad. Aunado a esto, los sistemas de abastecimiento de agua son insuficientes, y las redes de distribución de agua potable han rebasado su vida útil con capacidades insuficientes y sin la sectorización necesaria, lo que ocasiona importantes pérdidas físicas del vital líquido. De igual manera el sistema pluvial no es apto, ya que no cuenta con la infraestructura necesaria para enfrentar los problemas de inundaciones que se generan durante la temporada de lluvias. Así mismo la construcción de viviendas en zonas irregulares representa un conflicto ya que son susceptibles a sufrir inundaciones y que requieren sistemas de bombeo para desalojar los excedentes.

En el valle de San Luis Potosí se han realizado una gran cantidad de estudios en relación a la problemática del agua, ya sea desde el análisis de sus condiciones climáticas, topográficas, subterráneas, por contaminación, etc. Sin embargo destacan 3 investigaciones; la primera de ellas fue hecha por Hernández (2015), denominado como “Usos del agua en la ciudad de San Luis Potosí, 1831-1887” con el objetivo de analizar la gestión de los cuerpos de agua y de los abastecimientos hidráulicos, permitiendo que se conozcan las condiciones y necesidades de la población que habitaba en la región hace casi 200 años, y de esta manera, establecer bases del comportamiento y manejo del recurso hídrico, como precursores de la situación que actualmente se vive. La segunda investigación que cobra relevancia es la de Guevara (2007) con su trabajo “Distribución espacial y abastecimiento del agua para uso humano, en el área metropolitana de la ciudad de San Luis Potosí: problemática, implicaciones y alternativas” y en el que analiza las características físicas, sociales y económicas que en conjunto afectan el panorama y la problemática actual de abastecimiento de agua potable de la zona metropolitana de la capital potosina. En pocas palabras, este documento es una guía que permitió identificar los problemas que se presentaron en la región, así como también especular sobre un modelo de captura de agua de lluvia en la zona urbana, que permitiera ser una medida de mitigación al problema. La tercera investigación de suma importancia y que lleva una gran relación con este estudio es el que realizó por Méndez (2017) denominado como “Estimación del uso y aprovechamiento del agua en el estado de San Luis Potosí a través de un modelo de distribución espacial”. El objetivo del trabajo fue generar una estrategia de distribución espacial, que ayudara a asociar el recurso hídrico y su distribución espacial en todo el estado, teniendo en cuenta los usos y aprovechamientos que se le dan. Se utilizaron métodos geoespaciales para determinar el modelo de distribución y como resultado se obtuvo un análisis multitemporal del comportamiento de los recursos hídricos en las cuatro regiones del estado (altiplano, huasteca, media, centro).

## **Problemática**

Debido al crecimiento poblacional y económico de las últimas décadas en el valle de San Luis Potosí, se ha incrementado la demanda hídrica para cubrir las necesidades básicas, industriales, ganaderas y agrícolas de la región. Sin embargo, el acceso al agua dentro del valle es complicado, derivado de las condiciones geográficas y climáticas que inciden en la baja disponibilidad de agua superficial, por lo cual el agua es obtenida principalmente de fuentes subterráneas. No obstante, la gestión del recurso hídrico se ha llevado a cabo de manera inadecuada e ineficiente, provocando el abatimiento del acuífero, una extracción a mayor profundidad y la generación de zonas de subsidencia. Los modelos de gestión hídrica hasta ahora utilizados por los diferentes organismos operadores del agua, carecen de la integración de factores que converjan en el manejo adecuado del agua. De manera que el empleo de procesos geoespaciales pueden ser alternativas para implementar mecanismos geoestadísticos de análisis, como el índice del uso y aprovechamiento del agua, recientemente probado científicamente para evaluar el manejo sostenible de los recursos hídricos en la región.

## **Estado del arte de la problemática: Necesidad de métodos de modelación geoespacial-temporal a nivel internacional y nacional**

A partir de la década de los noventa se han desarrollado paulatinamente diversos procesos de análisis y el manejo de datos espaciales (Goodchild y Haining, 2005). Actualmente la información geoespacial juega un papel importante en la toma de decisiones de sectores gubernamentales, privados, académicos y público en general (SIAP, 2016). Las tecnologías geoespaciales ofrecen una visión única y completa del planeta tierra, ya que permiten la visualización de sus recursos y de los impactos a los cuales es sometida tanto por factores bióticos como abióticos (SAGARPA, 2016).

Según Aguirre (2009) “los datos espaciales provienen del análisis y de mediciones hechas con diversas técnicas empleadas en disciplinas tales como :la geodesia y la topografía, la cartografía, teledetección o percepción remota, fotogrametría, la geoestadística o análisis espacial, los sistemas de Posicionamiento Global de Navegación por Satélite (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG)”.

La tecnología geoespacial se ocupa de la adquisición, almacenamiento, procesamiento, interpretación, análisis, producción y distribución de la información (Mena, 2009). Hoy en día, a nivel global los procesos geoespaciales son utilizados como una solución a los conflictos que requieren de un análisis espacial y son aplicados en diversas áreas como la medicina, veterinaria, geología, arqueología, ingeniería, bienes raíces, etc.

Para el procesamiento y análisis de los datos recopilados, se utilizan programas computacionales que incluyen procesadores de imágenes o SIG (Barroso y Gutiérrez, 1997)). Los SIG son una herramienta de análisis espacial que mediante el uso de diversos modelos encuentran patrones que permiten entender los sucesos que dan origen y condicionan el comportamiento del fenómeno estudiado (Quintero, 2009). Longley y Batty (2003), afirman que el Geógrafo Roger Tomlinson en 1963 acuñó el término de “Sistemas de Información Geográfica”. Tomlinson desarrollo el primer inventario de recursos naturales en Canadá, dando como resultado el primer SIG funcional conocido como “Canada Geographic Information System (CGIS)” (Aguirre, 2009). En 1967 Estados Unidos creó “Dual Independent Map Encoding” (DIME) con la intención de crear archivos digitales de las calles con sus referencias y agregar los registros del censo de población, considerándolo como el segundo SIG de mayor relevancia histórica.

Los SIG han surgido como una aplicación directa en el análisis y modelación de fenómenos naturales como la hidrología (Díez, 2001). Los estudios hidrológicos basados en SIG tienen un gran campo de aplicación en donde se demanda una mayor investigación, planificación y gestión óptima. Los SIG pueden aplicarse tanto para fases de ciclo hidrológico como a procesos de la gestión integrada de recursos hídricos. De hecho se han abordado temas como el suministro de agua, calidad del agua, y problemas de gestión de aguas pluviales. A continuación se hace una

recopilación de algunas investigaciones relacionadas con los tópicos del agua y el uso de los SIG como herramientas de análisis.

Abbasnia *et al.*, (2018) realizaron una investigación denominada como “Groundwater quality assessment for irrigation purposes based on irrigation water quality index and its zoning with GIS in the villages of Chabahar, Sistan and Baluchistan, Iran” y que tenía como objetivo determinar la viabilidad del suministro de agua subterránea en el riego de los cultivos, en dependencia de la calidad de la misma. A través de un monitoreo a 40 pozos, se analizó diferentes parámetros como el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ , EC, SAR y  $\text{HCO}_3^-$ , que determinaron que el 40% de los pozos presentan una agua de excelente calidad y 60% restante es categorizada como buena. En este caso los SIG, ayudaron a representar la magnitud y extensión de los parámetros analizados mediante mapas de distribución espacial. La distribución espacial fue generada al momento de ingresar los datos analizados de los parámetros y tratados con el método de interpolación Inverse Distance Weight (IDW).

Carita (2017) desarrolló en Perú la investigación titulada como “Variabilidad espacio-temporal de la calidad de agua subterránea en el valle de Lurín” en la cual evaluó el comportamiento de los parámetros hidrogeoquímicos asociados a la calidad de agua subterránea para usos domésticos y de riego. El periodo de análisis considerado fue de enero del 2001 a diciembre del 2013, para el valle de Lurín. Durante la época de lluvias se analizaban un total de 93 pozos y para la época de secas alrededor de 97 pozos. El valle de Lurín ha tenido un crecimiento poblacional en los últimos años provocando una sobreexplotación del agua subterránea, lo que ha desarrollado entornos vulnerables que pueden ser propicios a diversos tipos de contaminación. Mediante la variabilidad espacio-temporal de los parámetros físico-químicos se obtuvo lo siguiente: el 70 % de los pozos presentan condiciones de agua bicarbonatada cálcica y el 30% restante como sulfatada cálcica. La calidad de agua para fines domésticos durante la época de lluvias en los distritos de Cieneguilla y Pachacámac muestra condiciones apropiadas de calidad de agua, mientras que el distrito de Lurín la calidad de sus aguas es considerada como media o baja. Y para el uso de riego de cultivos el agua del mayor parte del valle es considerada como agua de buena calidad. Con la llegada de la época de secas, la calidad del agua que es usada para riego disminuye, considerándose como calidad media o baja derivado del uso de fertilizantes en los campos de cultivo, por otro lado el agua destinada a uso doméstico sigue la misma tendencia que con la época de lluvias, considerando un comportamiento análogo en el área de estudio.

Curi (2017) en su trabajo “Caracterización de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del Océano Pacífico”, caracterizó espacial y temporalmente las sequías hidrológicas ocurridas del año de 1960 al 2015 en la vertiente peruana. Se seleccionaron 26 estaciones hidrométricas y a las cuales se les aplicó el Índice de Caudal Estandarizado, que permite evaluar la duración, intensidad y extensión espacial del fenómeno de estudio. Como resultado, se obtuvo que aunque las sequías hidrológicas poseen la misma intensidad y la duración, no tienen las mismas afectaciones en las diferentes cuencas de la vertiente peruana, ocasionado por la ubicación geográfica que influye en la oferta hídrica anual. Además se identificó los caudales que indican el inicio y término de los eventos moderados y extremadamente secos, permitiendo establecer los periodos húmedos y secos de cada cuenca. Este estudio es considerado como una herramienta

útil para los tomadores de decisión y planificadores, ya que se podrá administrar el abastecimiento del recurso hídrico para las diferentes actividades productivas, y desarrollar la capacidad institucional sobre prevención en temas de sequía, desarrollando un sistema de alerta temprana a eventos de dicho fenómeno.

Pachri *et al.*, (2013) en su trabajo “Development of Water Management Modeling by Using GIS in Chirchik River Basin, Uzbekistan”, utilizó el Modelo hidrológico basado en la geomorfología, datos espaciales de cartografía de uso de suelo e hidrología superficial, así como archivos satelitales de los sensores ASTER, DEM para el análisis de las temporadas de primavera y otoño. Por lo cual se generó un modelo geoespacial en base a la elevación, pendiente, uso de suelo, población, etc. Este modelo obtuvo una resolución final de 1000 metros con lo cual el autor lo determina como un método efectivo para el estudio del manejo de agua.

Lima *et al.*, (2012) en su investigación “Modelación geoespacial exploratoria en cuencas de llanura: caso de aplicación en la cuenca del Arroyo Dulce, Buenos Aires, Argentina” evaluó las técnicas y los procesos que pueden emplearse en la tarea de levantamiento y ajuste de geodatos y procesos de geomodelación asociados a la construcción de modelos espaciales con propósitos hidrológicos e hidrogeológicos. Se utilizaron modelos de elevación digital obtenidos del sensor SRTM, así como cartas topográficas para la creación de nuevos modelos de elevación con las herramientas de Arc Hydro y Topo Raster. De esta manera se obtuvieron modelos geoespaciales tanto de superficie como de subsuelo de la cuenca Arroyo Dulce. Este trabajo muestra que las herramientas de modelación en conjunto con algoritmos modificados tienen un gran potencial para la obtención de modelos hidrológicos e hidrogeológicos.

A nivel nacional se han realizado una gran cantidad de investigaciones en relación a los recursos hídricos. Tapia (2014) en su estudio “Avances en Geomática para la resolución de la problemática del agua en México”, lleva a cabo una compilación de las principales investigaciones que se han hecho en el país, y de las que destacan las siguientes:

Con relación a la eficiencia del uso de agua para cultivos se han desarrollado los siguientes trabajos de investigación como el caso de Coronel *et al.*, (2008), quienes estimaron la evapotranspiración real de la mayor parte del territorio nacional mediante las metodologías de SEBAL y SSEB, además del uso de imágenes satelitales del sensor MODIS. Gutiérrez *et al.*, (2008), utilizaron un SIG para la integración de la superficie irrigada, cultivada y cosechada, con el fin de establecer los cambios en los patrones productivos de los cultivos, derivado de la reducción de agua por la construcción de una presa. Otro trabajo fue el realizado por Zwart *et al.*, (2006), quienes estimaron la productividad de agua en el cultivo de trigo en el valle de Yaqui.

Los estudios de cuencas integrales han tomado gran auge en los últimos años, Galván (2011), realizó un estudio con el fin de establecer acciones de gestión territorial, integrando factores como la hidrología, fisiografía, clima, suelos, vegetación y sistemas productivos de una cuenca costera. Carrera y Gaskin (2008) proponen que en la cuenca del valle de México se utilice un SIG para el manejo de sus datos regionales (climatología, aprovechamientos subterráneos,

escorrentía). Con el objetivo de estimar la variabilidad espacial de la precipitación, mediante el uso de técnicas geoestadísticas, en el año 2010 Mendoza *et al.*, implementaron un modelo de distribución del balance hídrico para el lago de Cuitzeo en Michoacán, para delimitar la influencia regional del uso de suelo y su variación temporal, el uso de la percepción remota y los SIG fueron determinantes para el análisis del estudio.

La variabilidad espacial de la vulnerabilidad de un acuífero a ser contaminado también ha sido objeto de análisis. Marín *et al.*, (2012), establecieron zonas de influencia de variables espaciales en un entorno SIG, generando la localización de áreas adecuadas para establecer un relleno sanitario en Morelos de acuerdo a las características hidrogeológicas del sitio de estudio. Ramos *et al.*, (2012) identificaron la vulnerabilidad del acuífero de la zona de Chapala a ser contaminado, estableciendo la contaminación vertical y horizontal según las metodologías de SINTACS y GWR. Rodríguez y Rodríguez (2011), analizaron la subsidencia y la contaminación de agua subterránea por actividades antropogénicas, además se identificaron y georreferenciaron las fallas y fracturas del terreno en un SIG. Posteriormente se identificaron los daños y zonas de riesgo en relación a los planos urbanos. Ramos *et al.*, (2011) definieron la vulnerabilidad del acuífero y la calidad del agua en los valles centrales de Oaxaca mediante la técnica de análisis espacial de regresión geográficamente pesada. Por otro lado, el monitoreo de los cuerpos de agua y su relación en cuanto a la disponibilidad de agua se ha estudiado a través de la integración de las variables hidrológicas, como lo hizo López *et al.*, (2008), en el que estudió los cambios de la superficie del Lago de Chapala en los periodos de 1973-2007 mediante imágenes satelitales del sensor Landsat y Spot. Estudios similares realizó Lira (2006) mediante el Índice diferencial de agua normalizada (NDWI) para los lagos de la Ciudad de México, los pantanos de Centla y el lago de Pátzcuaro.

## **Estado del arte de la problemática: Metodologías de distribución espacial en el manejo del agua a nivel internacional y nacional**

La modelación de distribución espacial es definida por Mena (2006) como una estrategia que permite comprender los fenómenos a través de su comportamiento y evolución, y se logra con la adquisición de una serie de reglas paramétricas que se asocian a la medición y análisis de los recursos naturales. Los estudios que se han apoyado de los SIG para el análisis del agua, han centrado su atención al área del consumo y suministro dentro de las grandes urbes, analizando primeramente las condiciones actuales, que involucran la disponibilidad, infraestructura, calidad, población y economía, y proceden a una posterior predicción del fenómeno. El presente estado del arte provee de una descripción de las metodologías empleadas para estudiar la distribución espacial en el manejo del agua.

Dentro de las técnicas y metodologías utilizadas para el análisis de la distribución espacial podemos señalar a los trabajos de Jiang y Eastam (2000), quienes con técnicas de análisis multicriterio manifiestan procesos alternativos en la operación de apoyo a la toma de decisiones más importante de los desarrollos en el uso de SIG, aun cuando el paradigma del análisis multicriterio es una tendencia compleja ha servido para el análisis de la distribución espacial. El análisis multicriterio tuvo su origen en las ciencias económicas en la década de los años sesenta y se consolidó a principios de la década de los setenta (Alcántara, 2009). Según Malczewski (1999) este tipo de análisis se basa en lo siguiente:

1. Definición del conjunto de atributos (objetivos y capas de atributos asociados).
2. Identificación del conjunto de alternativas posibles.
3. Obtención de mapas conmensurables de atributos (normalizados).
4. Definición de pesos de los criterios (importancia relativa de cada atributo).
5. Combinación de los mapas de atributos normalizados y ponderados utilizando una regla de decisión para obtener el puntaje total para cada alternativa.
6. Obtención del orden de las alternativas de acuerdo con su puntaje total de desempeño (Franco, 2009).

A continuación, se presentan una serie de trabajos de investigación en donde el análisis multicriterio en conjunto con los SIG es utilizado como herramienta principal para el análisis de diversos tópicos del agua dentro del marco de la distribución espacial. Recientemente se han generado una serie de investigaciones en relación a los patrones de uso y aprovechamiento del recurso hídrico, en donde autores como: Mamade *et al.*, (2014), desarrollan un estudio sobre Portugal denominado “Spatial and temporal forecasting of water consumption at the DMA level using extensive measurements”, en dicho estudio se establece las zonas con mayores consumos de agua, de acuerdo al tamaño de población, la variabilidad estacional, y el tipo de actividad económica de la región.

Así mismo Yadav *et al.*, (2014) realizan un estudio de la ciudad de Ahmedabad en la India que lleva por nombre “Performance evaluation of water supply services in developing country: a case study of Ahmedabad city”, en el cual solo se analizan indicadores sobre el suministro y consumo de agua que radican en la infraestructura que posee la ciudad. El estudio basa la investigación en el análisis multicriterio que pondera los impactos generados asociados al ambiente de acuerdo a las condiciones de vida de la población. Es decir, el número de personas que habitan en una casa, el tipo de servicio que se tiene, la calidad de agua, costos de energía y reparación por el suministro, etc.

Cano y Escobar (2011), realizan el estudio de “Diseño de redes de monitoreo apoyadas por herramientas SIG y modelación Geoespacial” con el objetivo de implementar una metodología que sirva como identificador de sitios potenciales de monitoreo de calidad de aguas superficiales en la cuenca del Rio Grande en Colombia. El cual se llevó a cabo mediante el uso de herramientas SIG y análisis multicriterio con el método de las jerarquías analíticas (MJA). De manera que se obtuvieron los sitios prioritarios para el establecimiento de sistemas de monitoreo, siendo ubicadas primordialmente en las corrientes principales de las diversas micro cuencas que conforman el área de estudio. De lo cual se señala que algunas de las zonas de baja prioridad son consideradas debido a que son puntos de salida de la cuenca, en donde es importante conocer la calidad del agua. Este trabajo fue considerado como una alternativa que se puede llegar a emplear por las autoridades encargadas del manejo del recurso hídrico debido que es de fácil uso y en donde es posible utilizar toda la información disponible.

Por su parte Grecia también se ha involucrado en analizar la problemática del agua desde el punto de vista de los SIG. Panagopoulos *et al.*, (2011) en su estudio “Mapping Urban Water Demands Using Multi-Criteria Analysis and GIS”, al igual que en otros artículos, el análisis multicriterio es una parte fundamental en el estudio, elementos que permitieron describir que la ciudad de Mitilene ubicada en Lesbos presenta características físicas que influyeron en la consideración de los factores para la generación de mapas predictivos del consumo de agua. Algunas de las características físicas que se tomaron en cuenta fueron las pendientes de las laderas de la ciudad, la cercanía de la ciudad hacia el mar, la aproximación de la ciudad a zonas económicas, etc. Sin embargo, en estos estudios no se ha tomado en cuenta los factores bióticos que influyen en el comportamiento del agua.

Rao (2004) en su estudio “Multicriteria spatial decision analysis for forecasting urban water requirements: a case study of Dehradun city, India”, realiza un modelado para la predicción de los requerimientos de consumo de agua en la ciudad de Dehradun en India, y el estudio se apoya de un análisis multicriterio para establecer los factores que incidirán en la predicción del consumo de agua, con ayuda de los SIG e imágenes satelitales se genera la predicción y se establece en cartografía digital la distribución espacial del fenómeno de estudio, en el pasado, actualmente y en un futuro.

Sánchez *et al.*, (2004), realizó el estudio “Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica”, en donde se determinó las áreas prioritarias para el manejo del recurso hídrico, dichas áreas prioritarias fueron establecidas con base a tres criterios: calidad del agua, cantidad de agua aprovechada, y la recuperación de cobertura vegetal en las orillas de los ríos, por medio de análisis multicriterio y de SIG, por lo cual se generó un modelo que cataloga a las áreas como de baja, mediana y alta prioridad. La identificación de áreas prioritarias en categorías jerárquicas brinda información importante para gestionar las acciones que deben asentarse a corto, mediano y largo plazo para el aprovechamiento sustentable del recurso hídrico.

A nivel nacional Iturralde (2017) realizó la investigación denominada “Análisis multicriterio enfocado a la gestión de proyectos de agua potable en el municipio de Huimanguillo, Tabasco”, con el objetivo de establecer proyectos de abastecimiento de agua potable en distintas zonas del municipio, por lo cual se utilizó la metodología de superposición ponderada para la selección de los sitios óptimos, y como resultado se obtuvieron cinco escenarios para categorizar los sitios potenciales y fueron: no aceptable, poco aceptable, aceptable, adecuado y óptimo, la mayor parte del municipio tiene escenarios poco aceptables, basados en buena parte a sus condiciones geográficas. El autor señala que el uso de técnicas geomáticas permite seleccionar sitios propensos en donde se puede enfocar los esfuerzos en un análisis de mayor rigor técnico para su posterior factibilidad.

Otra metodología utilizada son los pesos evidencia, que usa al modelo probabilístico Bayesiano para evaluar la susceptibilidad de movimientos en masa mediante la sumatoria de pesos calculados de forma cuantitativa para cada una de las clases de los factores relacionados íntimamente con la ocurrencia de fenómenos de remoción de masa. Para el modelado de la susceptibilidad, el método calcula los pesos de cada variable o factor causante de movimientos basado en la presencia o ausencia de los movimientos dentro del área de estudio. Así los datos históricos de eventos son esenciales para el pesaje de los factores, el modelamiento también se basa en la suposición de que los futuros fenómenos ocurrirán en condiciones similares a aquellas que han contribuido a la ocurrencia de pasados fenómenos. Además, asume que dichos factores permanecen constantes en el tiempo. En estudios geoespaciales se ha utilizado para identificar el potencial minero, actualmente es utilizado para estimar las condiciones del agua subterránea (Méndez, 2009).

## **Hipótesis**

La realización de un análisis multitemporal del uso del agua en el valle de San Luis Potosí, permitirá estudiar las variables asociadas, para obtener una estimación de los usos y aprovechamientos del recurso en las últimas tres décadas a través de la determinación de un modelo de distribución espacial.

## **Objetivo general**

Generar un modelo para el análisis de la distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua para el valle de San Luis Potosí, permitiendo estimar el comportamiento del recurso Hídrico en la región.

## **Objetivos específicos.**

- I. Determinar variables a integrar al proceso de modelado de distribución espacial.
- II. Definir las cuencas y subcuencas del valle de San Luis Potosí.
- III. Efectuar un proceso de análisis multitemporal espacial.
- IV. Generar un análisis de los aprovechamientos subterráneos en las últimas tres décadas.

## Metodología

1. Revisión bibliográfica acerca del manejo, uso y aprovechamiento del recurso hídrico a nivel global, nacional y local. Posteriormente una revisión de las tecnologías utilizadas para evaluar el recurso hídrico en todas sus ramas (distribución, disponibilidad, abastecimiento, uso, calidad, etc.). Y por último conocer cómo se han utilizado los SIG, imágenes satelitales y análisis geoestadísticos en el uso y aprovechamiento del recurso hídrico.
2. Se delimitó el área de estudio, la cual abarca por completo la zona metropolitana de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez y la Sierra de San Miguelito. El área de estudio se encuentra acotada por los libramientos norte, oriente y poniente y por la autopista San Luis Potosí-Villa de Arriaga. Se identificaron las subcuencas que conforman el valle de San Luis Potosí, y se establecieron las características físicas y biológicas que posee el área de estudio. Con ayuda de diversas tecnologías geoespaciales se representaron los drenajes y escurrimientos principales de las subcuencas.
3. Se efectuó una recopilación de información de índole meteorológica y piezométrica, proveniente de las instituciones que gestionan el agua en el valle de San Luis Potosí (CONAGUA, INTERAPAS) y de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Así mismo, se manejaron imágenes satelitales procedentes del Sensor Landsat 5TM y 8 OLI para el desarrollo de diversos procesos geoespaciales. Las imágenes Satelitales fueron sometidas a un preprocesamiento, para eliminar los errores provenientes de la interacción atmosférica y del sensor en el software de ENVI 4.7. La información se compiló con base a los periodos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2009 y 2015 para el valle de San Luis Potosí.
4. Se efectuó, el cálculo del NDWI para las épocas de lluvias y sequías. Este proceso se desarrolló con el uso de imágenes satelitales, con el objetivo de identificar el comportamiento de la humedad, determinando las posibles zonas de disponibilidad de agua dentro del valle.
5. Se determinaron las variables que se integraron en el modelo de distribución espacial.
  - 5.1. La variable de evapotranspiración (ETR) fue calculada a través de la información proporcionada por 7 estaciones de la CONAGUA, donde los datos de precipitación y temperatura fueron utilizados en la Ecuación de Turc, con el fin de obtener la evapotranspiración para cada una de las estaciones meteorológicas. Estos datos de evapotranspiración fueron ingresados al Software de ArcGIS 10.2 y se procedió a realizar un análisis geoestadístico. Como resultado se obtuvo un raster con valores de evapotranspiración para el valle de San Luis Potosí en los periodos ya antes mencionados.

- 5.2. La variable de Producto Interno Bruto (PIB) fue estimada mediante los valores anuales de PIB para el estado de San Luis Potosí. La información fue obtenida de INEGI y del Directorio Estadístico de Unidades Económicas (DENU). Se determinó la distribución espacial de las actividades económicas dentro del valle de San Luis Potosí, así como el aporte económico al PIB estatal. Se ingresó la información al software de ArcGIS 10.2, donde se le aplicó un análisis geoestadístico. Con lo cual se asoció la demanda hídrica y el desarrollo económico de la región.
  - 5.3. La Variable de uso de suelo fue calculada a través de una clasificación supervisada, elaborado con imágenes satelitales del sensor Landsat. Se establecieron ocho categorías de clasificación de uso de suelo: cuerpo de agua, zona urbana, zona de cultivo, áreas verdes, matorral, bosque de pino-encino, suelo desnudo y cultivo de temporal. Los resultados permitieron establecer la dinámica de cambio de uso de suelo dentro del área de estudio.
  - 5.4. La Variable de Servicios Ambientales (VSA) fue obtenida con base a los resultados de la variable de uso de suelo y con la información de los volúmenes asignados a cada uso de suelo según la CONAGUA.
6. El modelo de distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua, fue generado a través del uso y aprovechamiento del agua ecológico y económico asociados a las variables del modelo. Además, se estimó una proyección del uso y aprovechamiento del agua ecológico y económico para el año 2050 mediante la metodología de ARIMA, la cual permite realizar predicciones óptimas en un plazo inmediato y corto del fenómeno de estudio.
  7. Se analizó el comportamiento de los aprovechamientos subterráneos en el valle de San Luis Potosí, a través de los datos piezométricos proporcionados por CONAGUA y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Donde se establecieron profundidades, gastos y los usos a los cuales el recurso hídrico es destinado. Así mismo, se realizó un modelo tridimensional de la ubicación y profundidad de los aprovechamientos subterráneos actuales.

En la Figura 2 se muestra la metodología descrita con anterioridad.

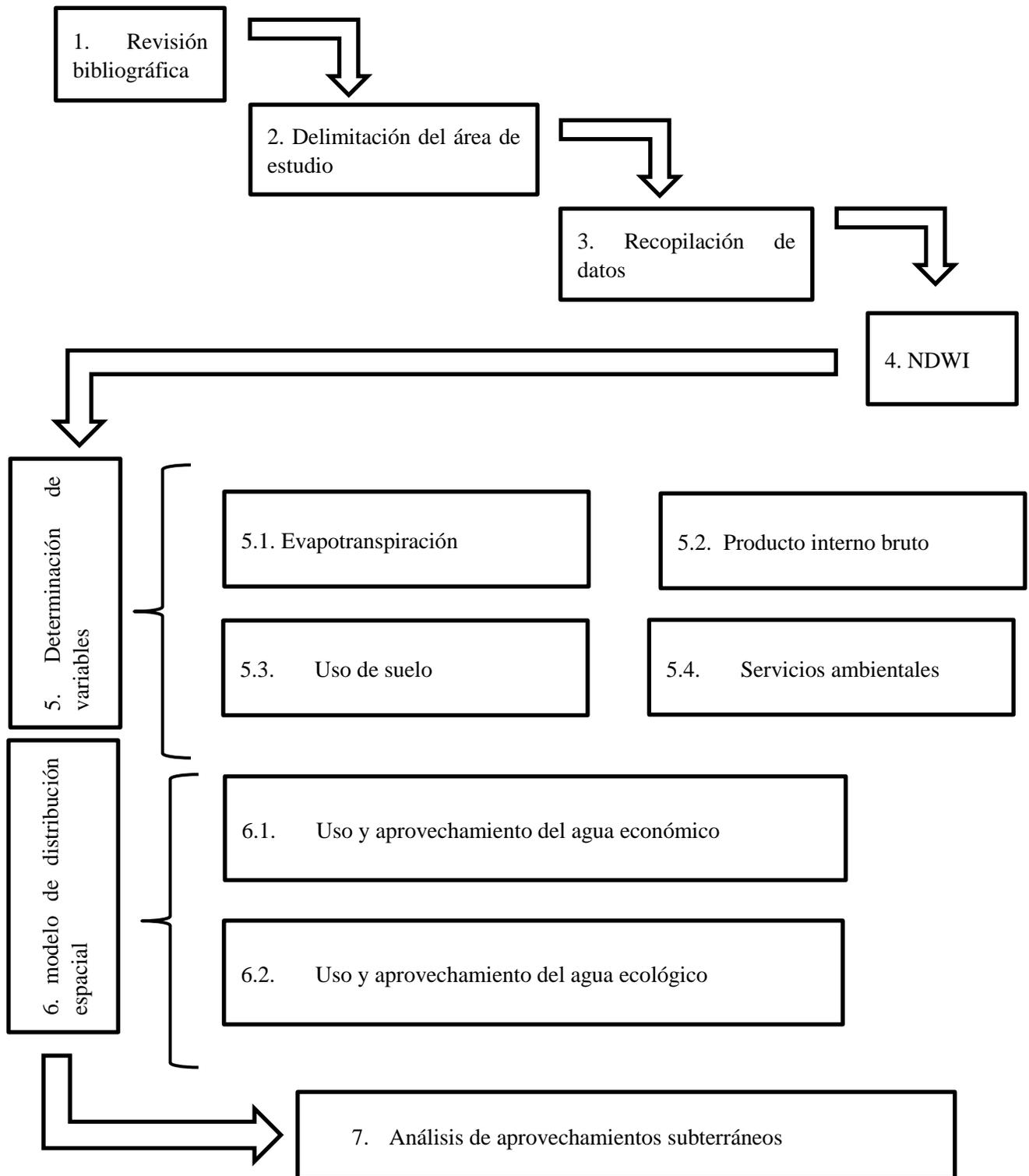


Figura 2. Esquema de la metodología utilizada.

## **Sinopsis**

La presente investigación está estructurada en cuatro capítulos y está conformada de la siguiente manera:

Capítulo 1. Definición y características de la cuenca en la zona de estudio. Se describen las características, demográficas, económicas, físicas y ecológicas. También se hace una descripción de las subcuencas que conforman el valle de San Luis Potosí, sus límites y características. Y por último se realiza una integración de los principales software en la modelación de cuencas hidrológicas, tanto a nivel internacional como nacional y su importancia para el manejo correcto del recurso hídrico.

Capítulo 2. Análisis multitemporal con el uso de imágenes satelitales y procesos geoestadísticos. Se describen las características de las imágenes satelitales usadas en el trabajo. La integración de datos meteorológicos también es descrita, indicando la ubicación de las estaciones meteorológicas y los datos que fueron utilizados. Posteriormente, se describen los tratamientos que se deben aplicar a las imágenes satelitales para su correcta operación. Y por último, se describe el proceso del análisis geoestadístico, así como los principales métodos de interpolación para llevar a cabo el análisis de las variables del modelo de distribución espacial.

Capítulo 3. Modelo de distribución espacial para el uso y aprovechamiento del agua. Se describen cada uno de los procesos empleados para la obtención de las variables de evapotranspiración, producto interno bruto, uso de suelo y servicios ambientales, así como el de NDWI. Posteriormente, se muestran los resultados del modelo de distribución del uso y aprovechamiento del agua ecológico y económico para el valle de San Luis Potosí. Y por último, se describe la metodología ARIMA utilizada para realizar las predicciones del modelo de distribución.

Capítulo 4. Análisis histórico de los aprovechamientos subterráneos en el valle de San Luis Potosí. Se describen las profundidades, gastos, piezometría y usos de los aprovechamientos subterráneos del acuífero de San Luis Potosí. Así como un modelo tridimensional de las profundidades de los pozos ubicados en el área de estudio.

## Capítulo 1. Definición y características de la cuenca en la zona de estudio

### 1.1. Área de estudio

La zona de estudio se localiza en el estado de San Luis Potosí, en la altiplanicie central mexicana. El valle de San Luis Potosí está conformado por seis municipios: Cerro de San Pedro, Mexquitic de Carmona, San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Villa de Arriaga y Villa de Reyes. Se ubica en los paralelos  $21^{\circ} 55' 27.71''$  y  $22^{\circ} 13' 56.50''$  latitud norte y los meridianos  $101^{\circ} 11' 17.25''$  y  $100^{\circ} 49' 35.19''$  longitud oeste (Figura 3). Cuenta con una superficie de  $1357 \text{ km}^2$  y abarca la mayor parte del municipio de San Luis Potosí. El área de estudio fue seleccionada con el propósito de obtener una cobertura total de la población urbana del valle de San Luis Potosí, por lo cual fue acotada por los libramientos norte, oriente y poniente debido a que son los límites la zona metropolitana de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez. Y hacia la zona sur del área de estudio por la autopista San Luis Potosí-Villa de Arriaga debido a que en esta zona se ha presentado un incremento de las actividades industriales y en la cual se estima siga aumentando el uso de suelo industrial, además esta zona está siendo considerada por parte de los organismos operadores de agua como una fuente de aprovechamientos subterráneos en un futuro por lo cual, se requiere conocer el comportamiento del recurso hídrico a través de características físicas como causas principales y corrientes.

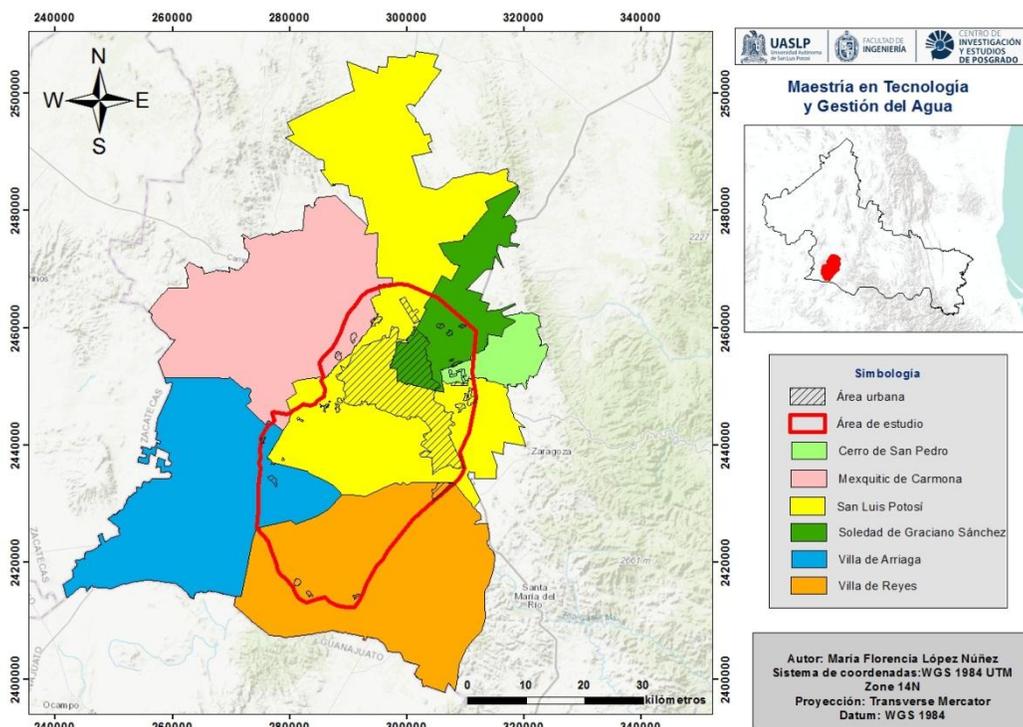


Figura 3. Localización del área de estudio.

## 1.2. Características de la cuenca en la zona de estudio

- 1.2.1. Demografía. La zona conurbada de San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez ocupa una extensión considerable del valle de San Luis Potosí. Es la urbe más grande del estado de San Luis Potosí y actualmente uno de cada dos habitantes urbanos del estado vive en esta región. Según la Encuesta Intercensal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el año 2015 se tenía una población de 1, 133,571 habitantes, de las cuales el 51.5 % eran mujeres y el 48.5 % eran hombres. La distribución poblacional está clasificada en un 94 % como población urbana y en un 6 % como rural.
- 1.2.2. Aspectos socioeconómicos. En el valle de San Luis Potosí se genera el 79 % del valor Bruto de la producción del Estado, por lo que esta urbe es un polo de desarrollo y crecimiento (Estudio Técnico del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí, 2018). Según el Directorio Estadístico de Unidades Económicas (DENUE) en el año 2017 se tenía un total de 56753 actividades económicas registradas para el valle de San Luis Potosí de las cuales, el 4% correspondía a actividades primarias, el 40% a actividades secundarias y el 56% a actividades terciarias.
- 1.2.3. Clima. El clima se clasifica dentro del tipo seco semicálido en el valle de San Luis Potosí; semiseco templado en la Sierra de San Miguelito y seco templado alrededor de la ciudad de San Luis Potosí (Estudio Técnico del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí). La temperatura media anual varía entre 16 y 18° C, la oscilación térmica es extremosa, ya que la diferencia entre el mes más cálido y el mes más frío es entre 7 y 14°C (Plan del Centro de Población Estratégico SLP-SGS, 2003). La precipitación media anual calculada para el periodo de 1942 al 2000, considerando la información disponible de siete estaciones climatológicas en el valle es de 402.6 milímetros anuales. El periodo de lluvias es de mayo a octubre (Estudio Técnico del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí, 2018).
- 1.2.4. Geología. El valle de San Luis Potosí corresponde en forma local a una cuenca limitada al oeste y suroeste por la Sierra de San Miguelito; al este por la sierra de Álvarez; y al norte se encuentra separado con el de Villa de Arista, por una serie de cerros y lomeríos denominados El Alto de la Melada (Cardona, 1990). El valle está formado por fallas normales orientadas hacia el norte, que rellenaron con flujos piroclásticos, flujos de lava y abanicos aluviales con una distribución regional. (Estudio Técnico del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí, 2018). La morfología de la región se desarrolló durante el periodo Cenozoico. Las rocas más antiguas que afloran en esta zona corresponden a calizas del Cretácico, en la parte oriental, junto con una intrusión de rocas ácidas

del Terciario, que forman el basamento hidrogeológico de la región (Carrillo, 1992).

1.2.5. Vegetación y Fauna. Predominan los matorrales que se distribuyen en la mayor parte del centro, norte y oeste del valle; los bosques de Pino-Encino se localizan en las partes altas de la Sierra de San Miguelito; los pastizales se ubican en el oeste y en la porción este. Dentro de la fauna que se puede encontrar esta la víbora de cascabel, halcón, calandria, liebre, cacomixtle y ardilla voladora (INEGI, 2018).

1.2.6. Vías de Comunicación. La zona de estudio es surcada por una red de comunicaciones terrestres con carreteras federales, interestatales, así como caminos intermunicipales. Las principales carreteras que cubren el territorio son la No.70 que comunica Tampico-SLP-Aguascalientes; la carretera No.80 que comunica la capital de S.L.P. con la Cd. de Lagos de Moreno, Jal.; la carretera No. 57 que inicia en Querétaro de Arteaga y termina en Saltillo y finalmente la carretera NO. 49 que comunica la capital de Zacatecas con la de San Luis Potosí (Plan de Desarrollo Urbano del estado de San Luis Potosí, 2002). También se cuenta con el aeropuerto internacional Ponciano Arriaga y una amplia red ferroviaria.

### **1.3. Estudios precedentes sobre la zona de estudio y caracterización geomorfológica de la cuenca**

La cuenca hidrográfica es un área drenada por una corriente o sistema interconectado de causas, tales que todo el escurrimiento generado en tal área es descargado a través de una única salida (Lull, 1964). Debido a lo anterior se considera la cuenca como la unidad geográfica más funcional para administrar el agua. La cuenca, sus recursos naturales y sus habitantes poseen condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales que les confieren características que son particulares de cada una (Dourojeanni, 1994).

Las características físicas de una cuenca, forman un conjunto de magnitudes que intervienen de manera importante y son condicionantes del régimen hidrológico. La Morfología comprende el estudio de las formas superficiales y en ese sentido la Geomorfología estudia y pretende cuantificar determinados rasgos de la superficie terrestre (Linsley *et al*, 1977). La climatología, el tipo y uso de suelo, la cobertura vegetal o el nivel de urbanización son factores prioritarios en los procesos geomorfológicos. Las propiedades geomorfológicas más estudiadas de una cuenca son:

- Área de la cuenca
- Longitud del cauce principal
- Perímetro de la cuenca
- Forma de la cuenca

- Sistema de drenaje
- Densidad de drenaje
- Extensión media del escurrimiento superficial
- Frecuencia de ríos
- Elevación de terrenos
- Altitud media de la cuenca

El área de estudio está comprendida dentro de la Región Hidrológica No. 37 El Salado, Cuenca Rio San José-Los Pilares y otras, subcuenca Presa San José; Cuenca San Pablo y otras, subcuenca Presa San Pablo, y la Región Hidrológica No. 26 Panuco, Cuenca Rio Tamuín, Subcuenca Rio Santa María Alto. (Figura 4).

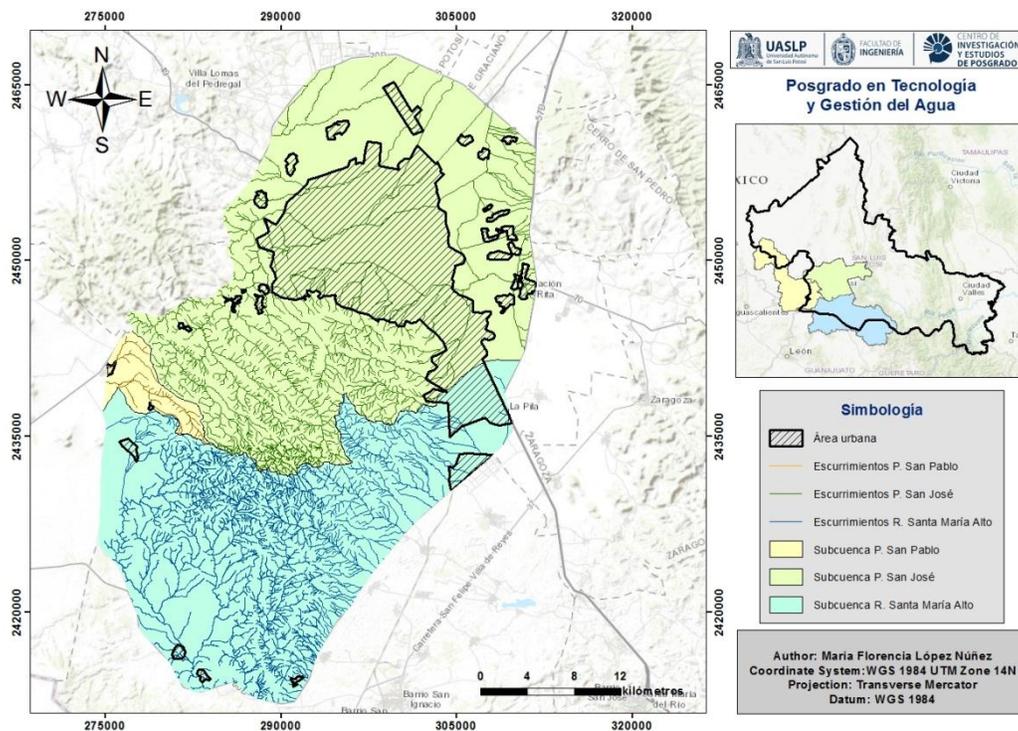


Figura 4. Subcuencas presentes en el área de estudio.

1.3.1. Hidrología de la subcuenca Presa San José. Ocupa una superficie de 789.85 km<sup>2</sup> dentro del área de estudio. Es una cuenca de tipo endorreica. El Rio Santiago es su principal colector y se forma a partir de los escurrimientos que proceden de una serie de pequeñas sierras situadas al oeste y suroeste del valle (Hernández, 2008). Los escurrimientos superficiales en la región de El Salado son efímeros e intermitentes de carácter torrencial. En su porción central, sur-suroeste y sureste, es surcado por los ríos Santiago, Paisano, Españita, Mexquitic y los arroyos de san Antonio, Calabacitas, La Virgen, Paraíso y Portezuelo, entre otros, perdiéndose en el valle, pero que en tiempo de lluvias forman las lagunas de Santa Rita y Laguna

Seca, descargando esta última hasta los llanos de la tinaja. Existen varias presas en la región, alimentadas por las distintas corrientes superficiales, denominadas: el peaje; San José; el Potosino; Álvaro Obregón; Cañada del Lobo; San Antonio y San Carlos; además del Tanque Tenorio, que recibe aguas residuales (Estudio Técnico del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí, 2018). Las presas el peaje; San José y El Potosino; son utilizadas para el abastecimiento de la zona conurbada de San Luis Potosí.

- 1.3.2. Hidrología de la subcuenca Presa San Pablo, la cual ocupa una superficie de 32.53 km<sup>2</sup> dentro del área de estudio. Esta misma se localiza al occidente y suroccidente del estado y hacia la porción sur de la Región Hidrológica No. 37 “denominada El Salado” (Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí, 2002). Esta es una cuenca de tipo endorreica, las corrientes que presenta dentro del área de estudio son de tipo intermitentes y drenan principalmente a la Presa San José. Existen corrientes de régimen intermitente entre los que sobresalen los arroyos Sandoval, La Barranca, Gavilanes, La Peñita, Santa rosa, Los Encinos y Belén, algunos de los cuales alimentan algunas lagunas conocidas como El perdido, Conejo, La Mesilla y La Salinera.
- 1.3.3. Hidrología de la subcuenca Rio Santa María Alto. Ocupa una superficie de 534.69 km<sup>2</sup> dentro del área de estudio. Es una cuenca de tipo exorreica, las corrientes principales son de carácter intermitente y drenan principalmente al Rio Santa María Bajo. Destaca el Rio Santa María como una de las corrientes más importantes de la red fluvial de la cuenca. Pertenece a la cuenca de mayor extensión en la entidad, se localiza en la porción sur y oriental del estado y en la zona noroccidental de la Región Hidrológica No. 37 “denominada El Salado” (Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí, 2002). En cuanto a la calidad del agua superficial en esta cuenca es en general es de baja salinidad.

Se han realizado diversos estudios que analizan el comportamiento de las dos subcuencas. Sin embargo la cuenca de San José tiene un mayor precedente de estudios, debido a la importancia que presenta que la capital potosina esté ubicada dentro de ésta. De hecho se tiene registro de estudios desde la década de los sesentas a los noventas, los cuales se especializan en la localización de fuentes de abastecimiento dentro del valle como Stretta y Del Arenal (1961), y Martínez (1984, 1986). También se han estudiado los acuíferos, su explotación y funcionamiento hidrogeológico como lo hizo Cardona (1990) que utilizó la hidrogeoquímica para clasificar el agua subterránea; Carrillo (1992) que analizó el flujo subterráneo mediante el análisis de la información geológica, hidrogeomorfología, geofísica e hidrogeoquímica. Además de diversas evaluaciones de las actividades antropogénicas en la calidad del agua subterránea (Carrillo, 2002; Noyola *et al.*, 2009; López *et al.*, 2013). Hernández (2008) identificó a partir de herramientas geoquímicas e isotópicas los diferentes tipos de recargas y los sistemas de flujo con los que se asocia.

## 1.4. Uso de tecnologías geoespaciales para delimitar y representar a la cuenca de la zona de estudio

### 1.4.1. Procesos en SIATL

En el año 2010 INEGI publicó en su página web El simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas denominado “SIATL”. Con el objetivo de disponer de una herramienta tecnológica que diseminara el conocimiento geográfico de una forma sencilla y gratuita. Por lo que se consolidó como una aplicación geoespacial que facilita la construcción de escenarios orientados a la toma de decisiones para apoyar diversos proyectos como: ordenamiento territorial, administración del agua, sustentabilidad de cuencas, prevención de desastres, construcción de infraestructura, estudios ecológicos, entre otros (INEGI, 2018). En la Tabla 1 se encuentran las capas de información vectorial que proporciona el SIATL.

Tabla 1. Grupos de información vectorial que contiene SIATL.

<b>Capa de Información</b>
<b>Grupo “Rasgos Hidrográficos”</b>
<b>Nombres de Rasgos Hidrográficos</b>
<b>Cuerpos de Agua 1:50 000</b>
<b>Coefficiente de escurrimiento 1:250 000</b>
<b>Grupo “Red Hidrográfica: 1:50 000”</b>
<b>Direcciones de flujo</b>
<b>Puntos de drenaje</b>
<b>Clasificación de la red (magnitud de orden, nivel jerárquico de corrientes)</b>
<b>Regiones 1:50 000</b>
<b>Cuencas 1:50 000</b>
<b>Subcuencas 1:50 000</b>
<b>Grupo “Vías de transporte”</b>
<b>Caminos</b>
<b>Carreteras</b>
<b>Vías de ferrocarril</b>
<b>Grupo “Geoestadístico y social”</b>
<b>Localidades urbanas y rurales con variables del Censo de Población y Vivienda 2010</b>
<b>Núcleos agrarios</b>
<b>División estatal y Municipal</b>
<b>Grupo “Altimetría”</b>
<b>Curvas de nivel 1:50 000</b>
<b>Modelo de relieve - sombreado</b>
<b>Modelo de relieve para anaglífos</b>
<b>Modelo de relieve - hipsográfico</b>
<b>Grupo “Servicio de imágenes”</b>

<b>Imagen cartográfica 1:50 000</b>
<b>Ortofotos 1:20 000</b>
<b>Imagen global MODIS NASA</b>

## 1.4.2. Procesos en Arc Hydro

Una de las extensiones más utilizadas en ArcGIS para el estudio de los recursos hidrológicos es Arc Hydro Tools. La cual es una herramienta que opera para el análisis de datos geoespaciales y temporales. Dentro de sus aplicaciones se encuentra el delinear y caracterizar las cuencas hidrográficas en formatos de trama y vector, definir y analizar redes hidrogeométricas, administrar datos de series temporales y configurar y exportar datos a modelos numéricos.

Cuenta con dos componentes clave: modelo de Arc Hydro Data y Herramientas de Arc Hydro; Estos dos componentes, junto con el marco de programación genérico, proporcionan un diseño de base de datos básico y un conjunto de herramientas que facilitan los análisis que a menudo se realizan en el ámbito de los recursos hídricos (Maidment y Morehouse, 2002).

El modelo de Arc Hydro es un modelo de conectividad hidrológica superficial, especialmente diseñado para obtener zonas de acumulaciones de flujo sobre los cauces de arroyos y ríos definidos por un modelo digital de elevación (Boninsegna y Villalba, 2006).

## 1.4.3. Otras tecnologías geoespaciales

Tradicionalmente la delimitación de cuencas, se ha realizado mediante la interpretación de los mapas topográficos. Este proceso ha ido evolucionando con la tecnología. Hoy en día los sistemas de información geográfica -SIG- proporcionan una gama amplia de aplicaciones y procesos, mismos que pueden realizar de una forma más sencilla y rápida el análisis y delimitación de una cuenca (Del Aguila, 2014).

1.4.3.1. QGIS. Es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto, el proyecto nació en mayo de 2002 y se estableció como un proyecto en SourceForge en junio del mismo año (QGIS User Guide, 2018). QGIS pretende ser un SIG amigable, proporcionando funciones y características comunes. El objetivo inicial del proyecto era proporcionar un visor de datos SIG. QGIS ofrece diversas funcionalidades como visualización de datos en diferentes formatos y proyecciones; explorar datos y composición de mapas; crear, editar, gestionar y exportar datos; analizar datos; publicar mapas en internet.

1.4.3.2. SAGA. Es una plataforma orientada al análisis y gestión de datos espaciales. Es un software gratuito y de código abierto, desarrollado originalmente por un pequeño

equipo del Departamento de Geografía Física de la Universidad de Göttingen (Cimmery, 2010). SAGA GIS está destinado a proporcionar a los científicos una plataforma efectiva pero fácil de aprender para implementar análisis espaciales y caracterización de la cuenca. Utiliza diferentes módulos estándar como análisis del terreno; clasificación de imagen; calculadora de grilla; gridding; geoestadística, etc.

- 1.4.3.3. HEC-RAS es un software diseñado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos. El sistema HEC-RAS contiene los siguientes componentes para el análisis hídrico: perfil del flujo de agua; simulación en una o dos dimensiones del flujo inestable; simulación del transporte de sedimentos y temperatura y el análisis de la calidad del agua (Gary y Brunner, 2016). Los modelos hidráulicos de río utilizan la gradiente y la topografía para evaluar el tirante, las velocidades y las zonas inundadas.
- 1.4.3.4. PRMS. El sistema de modelación de precipitación y escorrentía es un sistema de modelado basado en procesos físicos determinista y de parámetros distribuidos, desarrollado para evaluar la respuesta de diversas combinaciones de clima y uso de suelo en la hidrología de caudales e hidrología general. Los objetivos son simulación de evapotranspiración, escorrentía, infiltración, flujo de agua subterránea según lo determinado por la energía y los presupuestos de agua del dosel de la planta, la capa de nieve y la zona del suelo (United States Geological Survey, 2015); simulación de hidrología los presupuestos de agua en la escala de cuencas hidrográficas para escalas temporales que van desde días hasta siglos (USGS; 2015); integración de PRMS con otros modelos utilizados para el manejo de recursos naturales o con modelos de otras disciplinas científicas (USGS, 2015).
- 1.4.3.5. SWAT. (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo hidrológico a escala de cuenca desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la Universidad de Texas (TAMU). Permite cuantificar el impacto de las prácticas en suelos sobre la producción de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas en una cuenca y opera a escala temporal, diaria, mensual y anual para diferentes climas desde regiones áridas hasta zonas tropicales (Senet *et al.*, 2018). Además es un modelo de dominio público.
- 1.4.3.6. MODFLOW. Es el modelo hidrológico modular del USGS. MODFLOW se considera un estándar internacional para simular y predecir las condiciones del agua subterránea y las interacciones en las aguas subterráneas / aguas superficiales (USGS, 2018). Originalmente desarrollado únicamente como un código de simulación de flujo de aguas subterráneas, la estructura modular de MODFLOW ha proporcionado un marco robusto para la integración de capacidades de simulación adicionales que se basan y mejoran su alcance original (USGS, 2018). MODFLOW incluye herramientas para simular sistemas acoplados de agua subterránea y superficial, transporte de solutos, flujo de densidad variable (incluido el agua salada), compactación del sistema

acuífero y subsidencia de la tierra, estimación de parámetros y gestión del agua subterránea (USGS, 2018).

## 1.5. Representación de la cuenca, sus drenajes principales y escurrimientos

A continuación se presenta la descripción geomorfológica para las tres subcuencas; P. San José (Figura 5 y Tabla 2); P. San Pablo (Figura 6 y Tabla 3) y R. Santa María Alto (Figura 7 y Tabla 4) que conforman el área de estudio.

Tabla 2. Geomorfología de la subcuenca de Presa San José

<b>Subcuenca Presa San José</b>	
<b>Área</b>	789.85 km <sup>2</sup>
<b>Perímetro</b>	129.06 km
<b>Ancho</b>	6.12 km
<b>Densidad de Drenaje</b>	1.31 km
<b>Indicadores del cauce principal</b>	
<b>Elevación máxima</b>	2793 m
<b>Elevación media</b>	2355 m
<b>Elevación mínima</b>	1928 m
<b>Longitud</b>	37796 m
<b>Pendiente media</b>	2.31%
<b>Tiempo de concentración</b>	273.41 min
<b>Área drenada</b>	497.21 km <sup>2</sup>
<b>Perfil de elevaciones del cauce principal</b>	
<p>El gráfico muestra el perfil de elevaciones del cauce principal. El eje vertical representa la elevación en metros, con marcas desde 1900 hasta 2600. El eje horizontal representa la longitud en kilómetros, con marcas desde 45.3 hasta 0.68. La línea de perfil muestra una elevación que comienza en aproximadamente 2793 m a los 45.3 km y disminuye gradualmente hasta unos 1928 m a los 0.68 km. El área bajo la línea está sombreada en un tono beige.</p>	

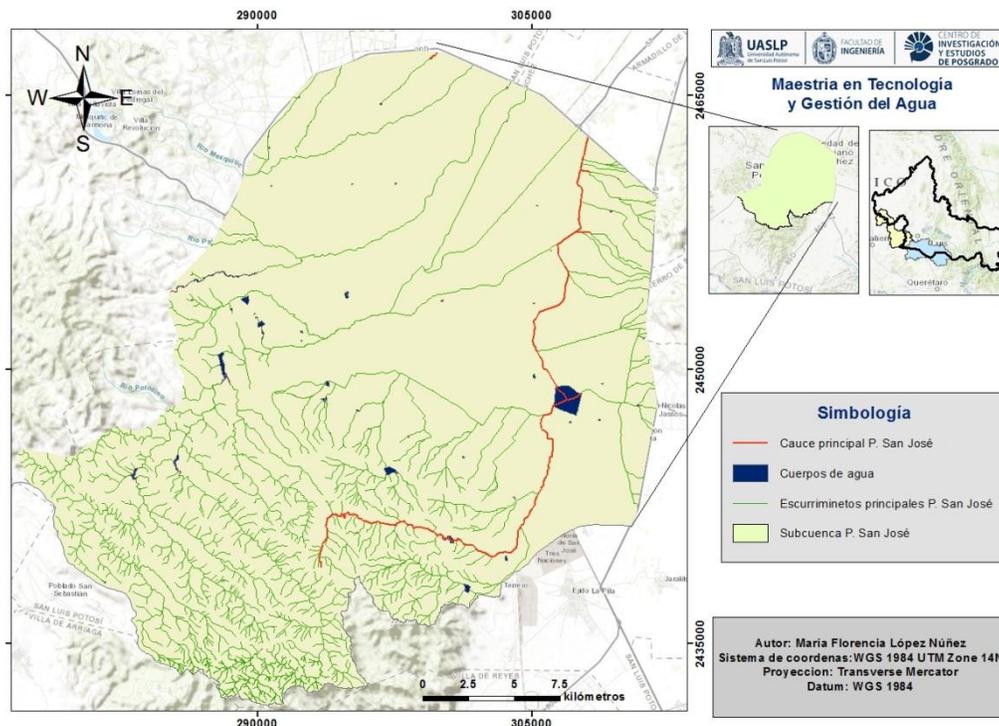


Figura 5. Subcuenca Presa San José, cauce principal y escurrimientos.

Tabla 3. Geomorfología subcuenca San Pablo

<b>Subcuenca Presa San Pablo</b>	
<b>Área</b>	32.53 km <sup>2</sup>
<b>Perímetro</b>	35.48 km
<b>Ancho</b>	0.91 km
<b>Densidad de Drenaje</b>	1.47 km
<b>Indicadores del cauce principal</b>	
<b>Elevación máxima</b>	2563 m
<b>Elevación media</b>	2386 m
<b>Elevación mínima</b>	2209 m
<b>Longitud</b>	14631 m
<b>Pendiente media</b>	2.41%
<b>Tiempo de concentración</b>	127.18 min
<b>Área drenada</b>	24.61 km <sup>2</sup>
<b>Perfil de elevaciones del cauce principal</b>	

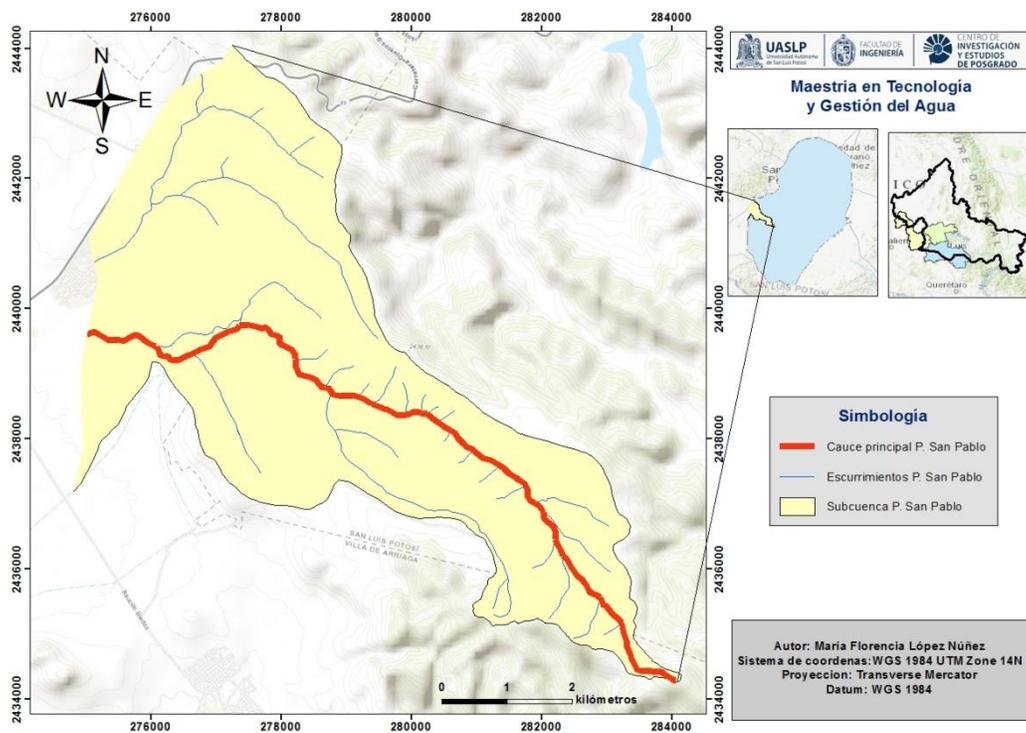
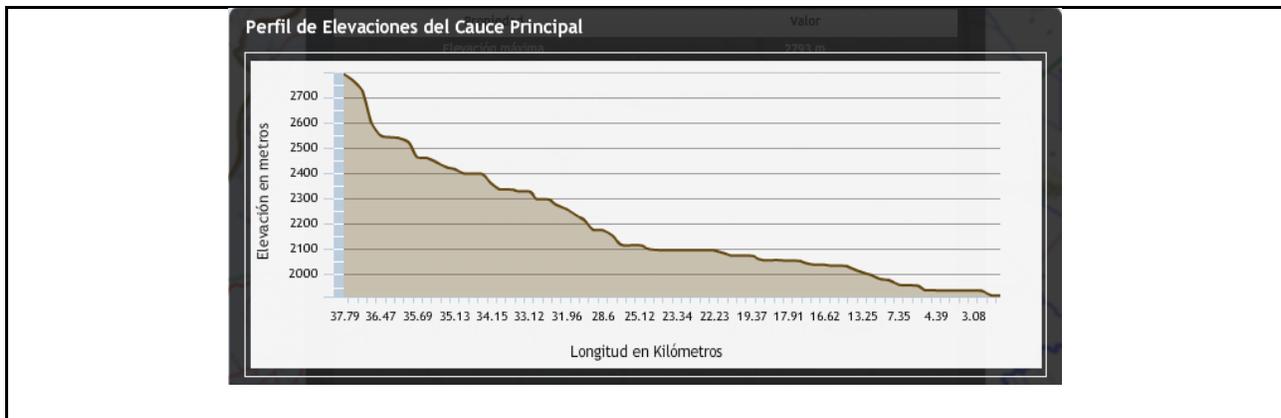


Figura 6. Subcuenca Presa San Pablo, cauce principal y escurrimientos

Tabla 4. Geomorfología subcuenca Rio Santa María Alto.

Subcuenca Rio Santa María Alto	
Área	534.69 km <sup>2</sup>
Perímetro	130.38 km
Ancho	4.10 km
Densidad de Drenaje	2.26 km
Indicadores del cauce principal	

<b>Elevación máxima</b>	2642 m
<b>Elevación media</b>	2236 m
<b>Elevación mínima</b>	1830 m
<b>Longitud</b>	45301 m
<b>Pendiente media</b>	1.79 %
<b>Tiempo de concentración</b>	350.80 min
<b>Área drenada</b>	943.20 km <sup>2</sup>
<b>Perfil de elevaciones del cauce principal</b>	

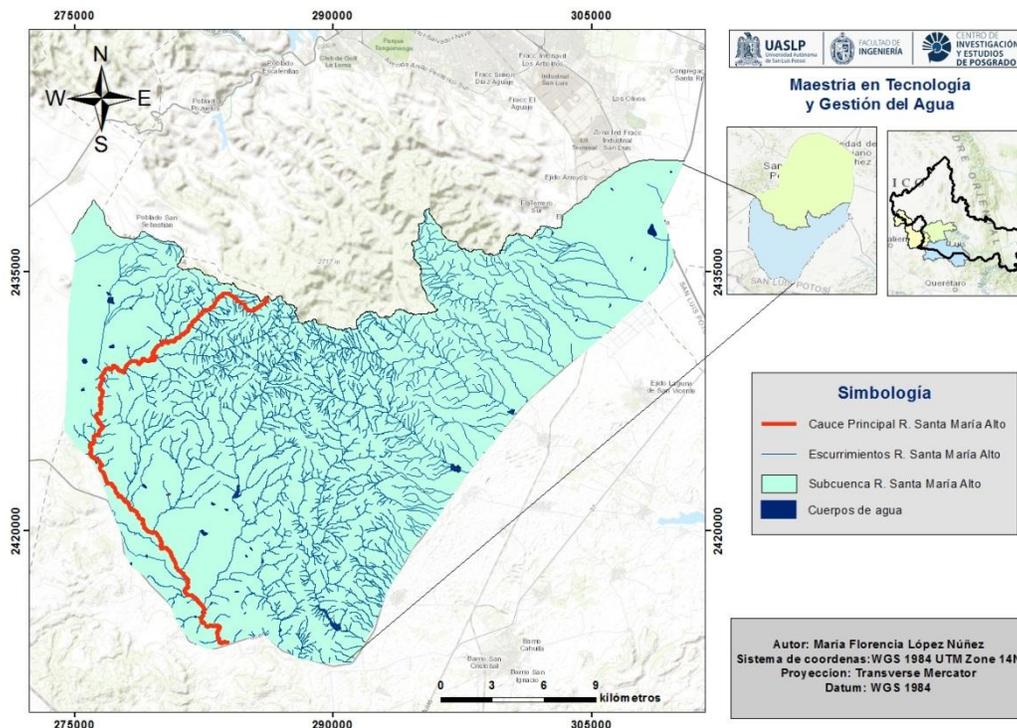
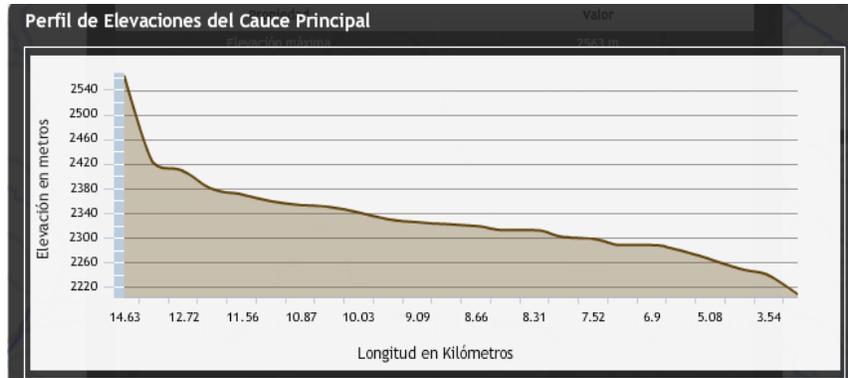


Figura 7. Subcuenca Río Santa María Alto, cauce principal y escurrimientos

Por último se presenta la cuenca, los drenajes principales y sus escurrimientos para el valle de San Luis Potosí, en formato tridimensional en la Figura 8.

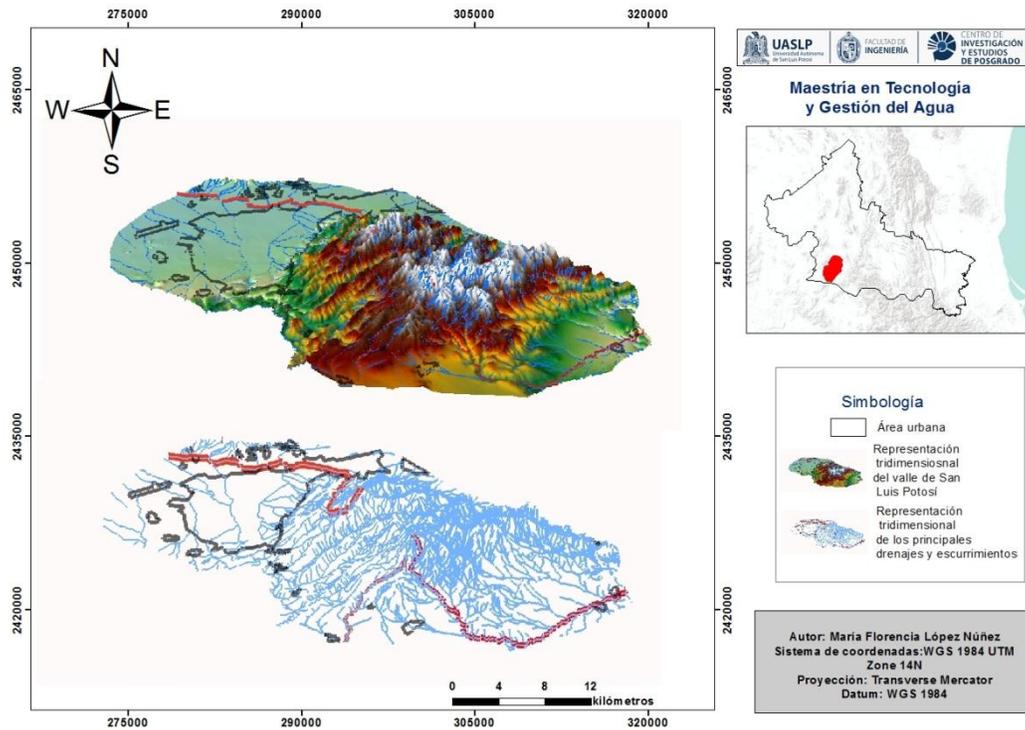


Figura 8. Modelo Tridimensional de la cuenca, sus drenajes y escurrimientos.

## 1.6. Conclusión

- La identificación de la unidad territorial y ecológica de la cuenca es fundamental, ya que facilita el manejo del agua. Debido a que se vincula, el funcionamiento de los ecosistemas y las actividades antropogénicas, formándose entonces una gestión integrada de los recursos hídricos.
- El valle de San Luis Potosí es de suma importancia en el Estado de San Luis Potosí, ya que es la región con el mayor crecimiento socio-económico. De hecho, se han realizado diversos estudios encaminados a establecer el papel que tiene el agua en el valle, a través de la medición de las variables del ciclo hidrológico y el conocimiento de sus características determinantes y consecuencias.
- Cabe resaltar que el área de estudio se encuentra dentro de tres subcuencas. Estas fueron analizadas por separado para conocer el correcto uso, aprovechamiento, manejo y control del agua; el mantenimiento, operación y administración de distritos y unidades de riego; y el control de la calidad del agua y su saneamiento.
- El uso de software y herramientas computacionales han beneficiado los estudios relacionados a los temas hídricos, pues permiten establecer de manera sencilla y eficaz diversos escenarios en cuanto a disponibilidad, producción, abastecimiento y contaminación de los cuerpos hídricos. La plataforma de SIATL ha establecido un nuevo uso, manejo y descarga de datos en México. Por lo que, se ha convertido en un herramienta inicial para conocer de manera general la delimitación de una cuenca y el comportamiento de sus escurrimientos.

## 1.7. Bibliografía

- Boninsegna, J., y Villalba, R. (2006). *Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan. Los condicionantes geográficos y climáticos*. Proyecto de desarrollo de escenarios climáticos y estudios de vulnerabilidad. Fundación T. Di Tella-SAyDS.
- Cardona, A. (1990). *Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo: México*. (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Carrillo, J. (1992). *The Hydrogeology of the San Luis Potosi Area, Mexico*. (Tesis Doctoral). University of London United Kingdom.
- Carrillo, J., Cardona, A., y Edmunds, W. (2002). *Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí, Basin, Mexico*. Journal of hidrology, 261 (1-4), 24-47 p.
- Cimmery, V. (2010). *User Guide for SAGA*. Version 2.0.
- CONAGUA. (2018). *Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí*. San Luis Potosí, S.L.P.
- Del Aguila, E. (2014). *Comparación de la delimitación de la micro cuenca " El zancudal" con Hidrology y Archydro Tools en el Cicfor-Macuya*.
- Dourojeanni, A. (1994). *Políticas públicas para el desarrollo sustentable de la gestión integrada de los recursos hídricos*.
- Gary, W. (2016). *HEC-RAS. River Analysis System User's Manual*.
- Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2001). *Plan de desarrollo urbano del estado de San Luis Potosí, 2001- 2020*. San Luis Potosí, S.L.P.
- H. Ayuntamiento de San Luis Potosí. (2003). *Plan de centro de población estratégico San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez*. San Luis Potosí, S.L.P.
- Hernández, J. (2008). *Identificación de la recarga natural e inducida en la cuenca de San Luis Potosí*. (Tesis Doctoral). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- INEGI. (2008). *Estudio hidrológico del estado de San Luis Potosí*. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. (2015). *Población*. Recuperado de: [http://www.cuentame.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/div\\_municipal.aspx?tema=me&e=24](http://www.cuentame.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=24)
- INEGI. (2018). *Flora y Fauna*. Recuperado de [http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/recursos\\_naturales.aspx?tema=me&e=24](http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/recursos_naturales.aspx?tema=me&e=24)
- INEGI. (2018). *SIATL*. Recuperado de [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#)
- Linsley, R., Kohler, M., y Paulus, J. (1977). *Hidrología para ingeniero*. Segunda edición. Capítulo 8: Relaciones entre precipitación y escorrentía, inciso 1: Retención Superficial. 211-213 p. Editorial McGraw Hill latinoamericana, S.A. Bogotá, Colombia.
- López, B., Ramos, J., Moran, J., Cardona, A., y Hernández, G. (2013). *Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el valle de San Luis Potosí*. Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, 65(1), 9-26 p.
- Lull, H. (1964). *Ecological and Sivicultural Aspects*. Section 6 in the handbook of applied hidrology, editor-in-chief-Ven-te-Chow, theme IV: Interception, page 6-6 to 6-13. McGraw Hill Book Company. New York, U.S.A.
- Maidment, D. R., y Morehouse, S. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources* (Vol. 1). ESRI, Inc.
- Markstrom, S., Regan, R., Hay, L., Viger, R., Webb, R., Payn, R., y Lanfontaine J. (2015). *PRMS-IV-the precipitation- Runoff Modeling System*, Version 4. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Capítulo B7, 158 p.
- Martínez, V. (1984). *Control geológico estructural del agua subterránea entre San Luis Potosí, Aguascalientes y Zacatecas*. Folleto Técnico 105, 25 p. Instituto de geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Martínez, V. (1997). *Actualización del marco geológico del subsuelo del valle de San Luis Potosí*. Folleto Técnico 105, 25 p. Instituto de geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Noyola, M., Ramos, J., Domínguez, E., Pineda, I., López, H., y Carbajal, N. (2009). *Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso valle de San Luis Potosí*. Revista mexicana de ciencias geológicas, 26 (2), 395-410 p.
- QGIS Project. (2018). *QGIS User Guide*. Recuperado de <https://www.qgis.org/es/site/forusers/trainingmaterial/index.html>
- Senet, A., Perez, J., Padilla, J., Raghavan, D. (2018). *Introduction y advanced Swat Workshops*.
- Servín, C., Mendoza, G. (2008). *Abasto futuro del agua potable análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México*. Cuadernos de Geografía, vol.17, 127-137 p.
- Stretta, E., y Del Arenal, R. (1961). *Carta Geohidrológica provisional de la cuenca de San Luis Potosí, S.L.P., México*. Instituto de ciencia aplicada, sección de hidrología y misión de geohidrología de la UNESCO. Instituto de geología de la UNAM.

## Capítulo 2. Análisis multitemporal con el uso de imágenes satelitales y procesos geoestadísticos

### 2.1. Caracterización de imágenes de satélite de resolución espacial de 30 metros de diversos periodos en las últimas tres décadas

Las imágenes empleadas en este trabajo pertenecen al sensor Landsat. Por más de 45 años el programa Landsat, ha suministrado información de los recursos terrestres a una amplia y variada comunidad de usuarios (USGS, 2018). La misión del Programa Landsat es proporcionar datos multiespectrales de resolución media de la superficie de la tierra, con el propósito de su utilización en una amplia gama de aplicaciones como seguridad gubernamental; gestión de la tierra y agua; cambio climático; exploración de petróleo y minerales; rendimientos agrícolas; contaminación y mapeo cartográfico, etc. El programa Landsat se ha conformado a través de ocho satélites, de los cuales se encuentran activos Landsat 5 y 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de National Aeronautics and Space Administration (NASA) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del USGS (INEGI, 2018).

Se utilizaron imágenes de los periodos de lluvias (mayo-septiembre) y secas (octubre-abril) para los años de 1990, 1995, 2000, 2005 y 2009 correspondientes a Landsat 5 TM y para el año 2015 y 2017 del sensor Landsat 8 OLI. Landsat 5 TM trabaja con 7 bandas espectrales, tres se encuentran en la región del visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal (INEGI, 2018). El sensor Landsat 8 OLI aumento el número de bandas, operando con un total de 11 bandas, de las cuales se añadió una banda azul costero, una banda calidad y dos bandas térmicas (Markham *et al*, 2010). Ambas tienen una resolución espacial de 30m y su resolución temporal es de 16 días.

La obtención de las imágenes satelitales se realizó a través de su descarga en el sitio web del USGS <https://glovis.usgs.gov/>. En la Tabla 5 se muestran las fechas y productos descargados requeridos.

Tabla 5. Características de las imágenes satelitales descargadas

Año	Periodos	Mes	Sensor
1990	Lluvia	Mayo	Landsat 5 TM
1990	Seca	Febrero	Landsat 5 TM
1995	Lluvia	Mayo	Landsat 5 TM
1995	Seca	Octubre	Landsat 5 TM
2000	Lluvia	Mayo	Landsat 5 TM
2000	Seca	Enero	Landsat 5 TM
2005	Lluvia	Julio	Landsat 5 TM
2005	Seca	Octubre	Landsat 5 TM

Año	Periodos	Mes	Sensor
2009	Lluvia	junio	Landsat 5 TM
2009	Seca	marzo	Landsat 5 TM
2015	Lluvia	julio	Landsat 8 OLI
2015	Seca	enero	Landsat 8 OLI
2017	Lluvia	mayo	Landsat 8 OLI
2017	Seca	noviembre	Landsat 8 OLI

## 2.2. Integración de juegos de datos meteorológicos de las últimas tres décadas

Se obtuvieron datos meteorológicos de temperatura y precipitación mensuales para los años de 1990, 1995, 2000, 2005, 2009 y 2015. Provenientes de seis estaciones meteorológicas (24024, 24069, 24070, 24111, 24153 y 2463) ubicadas dentro del valle de San Luis Potosí, pertenecientes a la CONAGUA. Los datos fueron adquiridos en el portal del Servicio Meteorológico Nacional dentro del apartado de información climatológica (<http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>). En la Figura 9 se muestran la ubicación de las estaciones utilizadas.

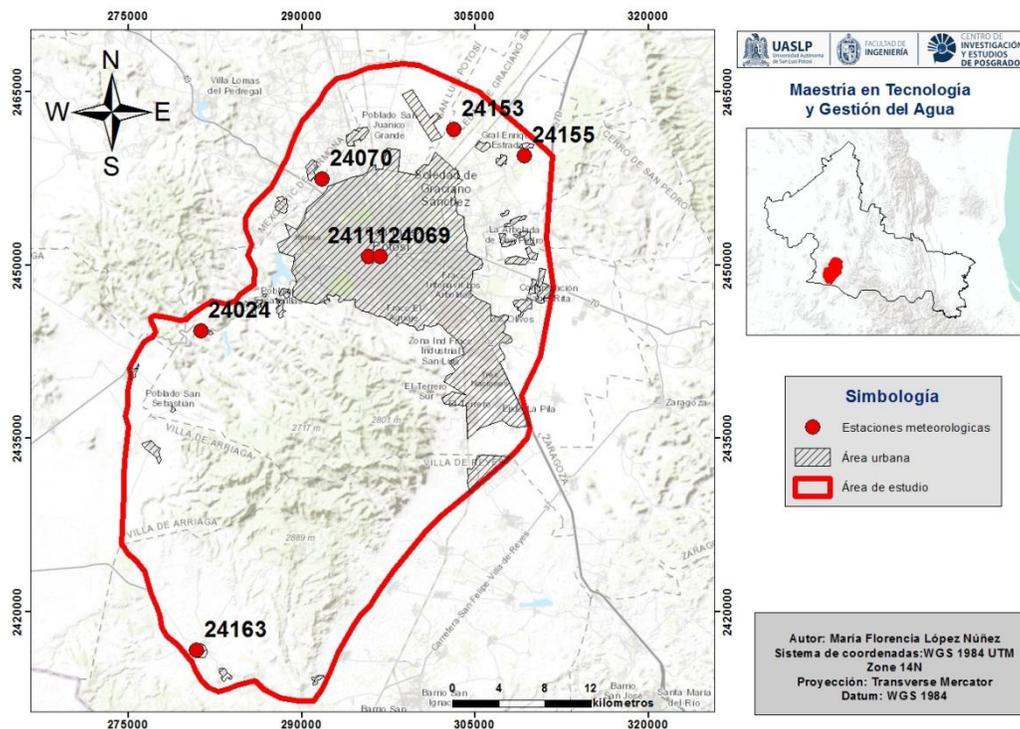


Figura 9. Estaciones meteorológicas en el valle de San Luis Potosí

## 2.3. Proceso de correcciones radiométricas y atmosféricas a las imágenes de satélite

Los datos recopilados en una imagen satelital son representados como Niveles Digitales (ND). Los ND no representan de manera directa ningún atributo biofísico, debido a esto es necesario dar un preprocesamiento a las imágenes satelitales. La corrección radiométrica y atmosférica son los tratamientos básicos que se deben hacer a cualquier imagen satelital. Son un conjunto de herramientas que ayudan a la reparación del valor de pixel que ha sufrido un fallo derivado de aspectos atmosféricos, errores en los sensores, topografía, temporadas del año, etc. (Ambrosio, 2002). Para llevar a cabo las correcciones es necesario que primeramente se genere la corrección radiométrica y posteriormente la corrección atmosférica.

### 2.3.1. Corrección radiométrica.

La corrección radiométrica convertirá la información original (bruta) de cada pixel a niveles de radiancia y seguidamente a niveles de reflectancia. Existen dos métodos clásicos para realizar la primera parte de la conversión, que es la obtención de radiancia por el método de ganancia y sesgo, y el método de escalamiento de la radiancia espectral. A partir de esos datos se realiza la conversión a niveles de reflectancia.

En este trabajo se utilizó la herramienta de Landsat Calibration que contiene el Software Environment for Visualizing Images (ENVI) para generar la conversión de radiancia y reflectancia. La obtención de la radiancia se generó a través la Ecuación 1, la cual consiste en multiplicar los valores del número digital por las ganancias que registra el sensor y sumar las pérdidas del mismo (Chander y Markham, 2003).

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale}$$

Ecuación 1. Obtención de la radiancia.

Dónde:

$L_{\lambda}$  = Radiancia

$G_{rescale}$  = Ganancia de la banda

$Q_{cal}$  = ND del pixel

$B_{rescale}$  = Perdidas de la banda

La reflectancia ajusta los valores de radiancia en función de la escena y de los ajustes de ganancia del sensor. Los ajustes se basan en la elevación del sol, la fecha de adquisición y las propiedades del sensor. Para la obtención de la reflectancia se manejó la Ecuación 2.

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{ESUN_{\lambda} * COS\theta_S}$$

Ecuación 2. Obtención de la reflectancia

Dónde:

$\rho_{\lambda}$  = Reflectancia

$d$  = Fecha de adquisición de la imagen

$ESUN_{\lambda}$  = Irradiancia solar para cada banda

$\theta_S$  = Valor de zenit solar

$L_{\lambda}$  = Radiancia espectral

### 2.3.2. Corrección atmosférica

La corrección atmosférica tiene como propósito eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor, como producto de la interacción con la atmósfera (Aguilar *et al*, 2014).

Mediante el módulo Fast line-of-sight Atmospheric Analysis Of Spectral Hypercubes (FLAASH) del software ENVI, se realizó el proceso de corrección atmosférica. Este módulo se basa inicialmente en la ecuación estándar de radiancia espectral para cada píxel del sensor ( $L$ ), que se aplica al rango de longitud de onda solar (emisión termal) y superficies lambertianas, planas o sus equivalentes (Castillo, 2012).

Según Aguilar *et al* (2014), la corrección atmosférica es necesaria cuando existen estudios multitemporales, que comparan magnitudes y propiedades en fechas diferentes, por lo tanto la atmosfera cambia de una fecha a otra y es cuando se deben corregir los valores de las radiancias registradas.

## **2.4. Método geoestadístico como herramienta de análisis espacial a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

La geoestadística tuvo su origen en los sesenta, cuando Matheron formalizó y generalizó un conjunto de técnicas desarrolladas por Krige (1941) que explotaban la correlación espacial en la evaluación y predicción de reservas en las minas de oro en Sudáfrica (Díaz, 2002). Según Moral (2004), “La geoestadística comprende a un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua”. Por tal motivo ha sido ampliamente aplicada en diversas ramas como en la industria petrolera, minería, pesca, geofísica, marina, hidrogeología, medio ambiente, estudios forestales, salud pública, ingeniería civil, procesamiento de imágenes, cartografía, finanzas, ciencias de materiales, meteorología, edafología, etc.

El uso de técnicas geoestadísticas y SIG, se ha convertido hoy en día en una herramienta de gran capacidad y aplicabilidad para el estudio de variables espaciales (Guerra *et al*, 2006). Burrough y McDonnell (1998), han definido a los SIG como un conjunto de herramientas que colectan, almacenan, recuperan, transforman y muestran la variabilidad espacial de los datos en el mundo real. Sin embargo los resultados que nos arrojan los SIG deben ser validados por técnicas estadísticas y matemáticas, y es entonces que la geoestadística surge como una herramienta indispensable para certificar los resultados.

## **2.5. Modelos de interpolación espacial**

Miranda y Condal (2003), describieron a la interpolación espacial como “un procedimiento matemático utilizado para predecir el valor de un atributo en una localidad precisa a partir de valores obtenidos de puntos vecinos, ubicados al interior de la misma área de estudio”. La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos; sin embargo, se necesita de una considerable cantidad de puntos en el área de estudio, lo cual limita su utilización (Johnston et al. 2001). La interpolación espacial es capaz de predecir valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido, etc. (ESRI, 2016).

Los diferentes métodos de interpolación espacial se clasifican en dos grandes categorías: determinísticos y probabilísticos (Maune, 2001). Los métodos determinísticos de interpolación asignan valores a las ubicaciones basándose en los valores medidos circundantes y en fórmulas matemáticas específicas que determinan la superficie resultante (ESRI, 2016). Los métodos de interpolación determinísticos más comunes son: ponderación de distancia inversa (IDW), Vecino natural, Tendencia y Spline.

Los métodos de interpolación probabilísticos, son populares debido a que infieren una gran cantidad de información utilizando las muestras disponibles (Maune, 2001). El método de interpolación probabilístico más común es el Kriging, debido a que tiene la capacidad de producir una superficie de predicción con alguna medida de certeza o exactitud. A continuación se detallan algunos de los métodos de interpolación que son de los más utilizados según ESRI (2016).

- 2.5.1. IDW. Utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas, mediante el cálculo de los valores promedios de cada punto y la relación de la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio. IDW se encuentra disponible en la mayoría de los programas de SIG (Pérez y Mas, 2009). Es considerado como uno de los más usados en los estudios de análisis espacial.
- 2.5.2. Kriging. Es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie de valores partir de un agregado de puntos dispersados con valores z. Es necesario que se realice un análisis acerca del comportamiento espacial del fenómeno representado por los valores z antes de seleccionar el mejor método de estimación para generar la superficie de salida.
- 2.5.3. Vecino natural. También se conoce como interpolación de Sibson. Se fundamenta en hallar al subconjunto de muestras de entrada más cercano a un punto de consulta y aplica ponderaciones sobre ellas basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor (Sibson, 1981).
- 2.5.4. Spline. Este método de interpolación estima valores mediante una función matemática que la cual minimiza la curvatura general de la superficie, dando como resultado una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.
- 2.5.5. Tendencia. Es una interpolación polinómica global que se ajusta una superficie definida en relación a una función matemática sobre los puntos de muestra de entrada, la superficie generada cambia gradualmente y captura patrones de escala sin detallar en los datos.

En este estudio se trabajó con el método de interpolación del IDW y con Kriging, que serán explicados con mayor detalle en el Capítulo 3.

## 2.6. Conclusión

- El uso de imágenes satelitales ha surgido como una herramienta de suma importancia en el estudio de fenómenos multitemporales. A partir de los años cincuenta se ha contado con una diversa gama de imágenes multiespectrales, mismas que han permitido a las comunidades científicas relacionar en tiempo real el fenómeno de estudio y los factores que lo engloban.
- Las imágenes utilizadas en este estudio son provenientes del sensor Landsat en específico de las versiones 5 TM y 8 OLI. A las cuales les fue necesario realizar los procesos de corrección atmosférica y radiométrica, para eliminar los fallos que se tuvieran derivados de la interacción con la atmosfera, de la superficie terrestre y del mismo sensor.
- Se integraron un conjunto de datos de precipitación y temperatura de diversas estaciones meteorológicas pertenecientes a la CONAGUA. Dichos datos fueron recolectados de las últimas tres décadas.
- La geoestadística y los SIG, han tenido un creciente desarrollo en los estudios de variabilidad espacial, dado que los procesos y análisis de los datos se realizan de manera fácil, eficaz, de bajo costo y con cierta validez. Permitiendo que sean utilizadas como herramientas para las tomas de decisiones de sectores gubernamentales, privados, académicos, etc.
- Los métodos de interpolación usados para este trabajo fueron tanto determinísticos como probabilísticos. El IDW y el Kriging, fueron los seleccionados debido a que presentaron un mejor ajuste con las variables del modelo de distribución, las cuales serán detalladas en el siguiente capítulo.

## 2.7. Bibliografía

- Aguilar, H., Zamora, y Vargas, C. (2014). *Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapid eye, Spot, Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI*. Revista Geográfica de América Central, 53, 39-59 p.
- Castillo, O. (2012). *Aplicación espectral y topológica en el procesamiento de imágenes satélites*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- ESRI. (2016). *Comparar métodos de interpolación*. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/comparing-interpolation-methods.htm>
- INEGI. (2018). *Imágenes de Satélite LANDSAT*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.aspx>
- INEGI. *Aspectos técnicos de las imágenes Landsat*. Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos\\_tecnicos\\_imagenes\\_landsat.pdf](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_imagenes_landsat.pdf)
- Maune, D. (2001). *Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual*. 207-236 p.
- Markham, B. L., Dabney, P. W., Murphy-Morris, J. E., Pedelty, J. A., Knight, E. J., Kvaran, G., & Barsi, J. A. (2010, July). *The Landsat data continuity mission operational land imager (OLI) radiometric calibration*. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International (pp. 2283-2286). IEEE.
- Méndez, K. (2017). *Estimación del uso y aprovechamiento del agua en el estado de San Luis Potosí a través de un modelo de distribución espacial*. (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P.
- Miranda, M., y Condal, R. (2003). *Importancia del análisis estadístico exploratorio en el proceso de interpolación espacial: caso de estudio Reserva Forestal Valdivia*. Bosque (Valdivia), 24(2), 29-42.
- Pérez, A. y Mas, J. (2009), “Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación”. Investigaciones Geográficas, 69, 53-67 p.

Sibson, R. (1981). *Brief description of natural Neighbor interpolation*. Interpolating Multivariate data. 21-36. Nueva York.

USGS. (2018). *Manual de usuarios de datos Landsat 8. Sección 1*. Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-18-data-users-handbook-section-1>

## Capítulo 3. Modelo de distribución espacial para el uso y aprovechamiento del agua

### 3.1. Determinación de variables y parámetros

Las variables que se integraron en el modelo de distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua ecológico y económico en el valle de San Luis Potosí son la evapotranspiración (ETR), el producto interno bruto (PIB), el uso de suelo y los servicios ambientales (VSA). Las variables fueron seleccionadas siguiendo la metodología que utilizaron Huang *et al.*, (2014), para la estimación del uso y aprovechamiento del agua en la cuenca Tuhai Majia en China.

En adición se realizó el cálculo del NDWI, como una herramienta que ayuda a comprender la humedad del suelo en distintos periodos temporales generando análisis preliminares para el cálculo de la evapotranspiración. En la Figura 10 se muestra el esquema de la integración de las variables dentro del modelo de distribución espacial.

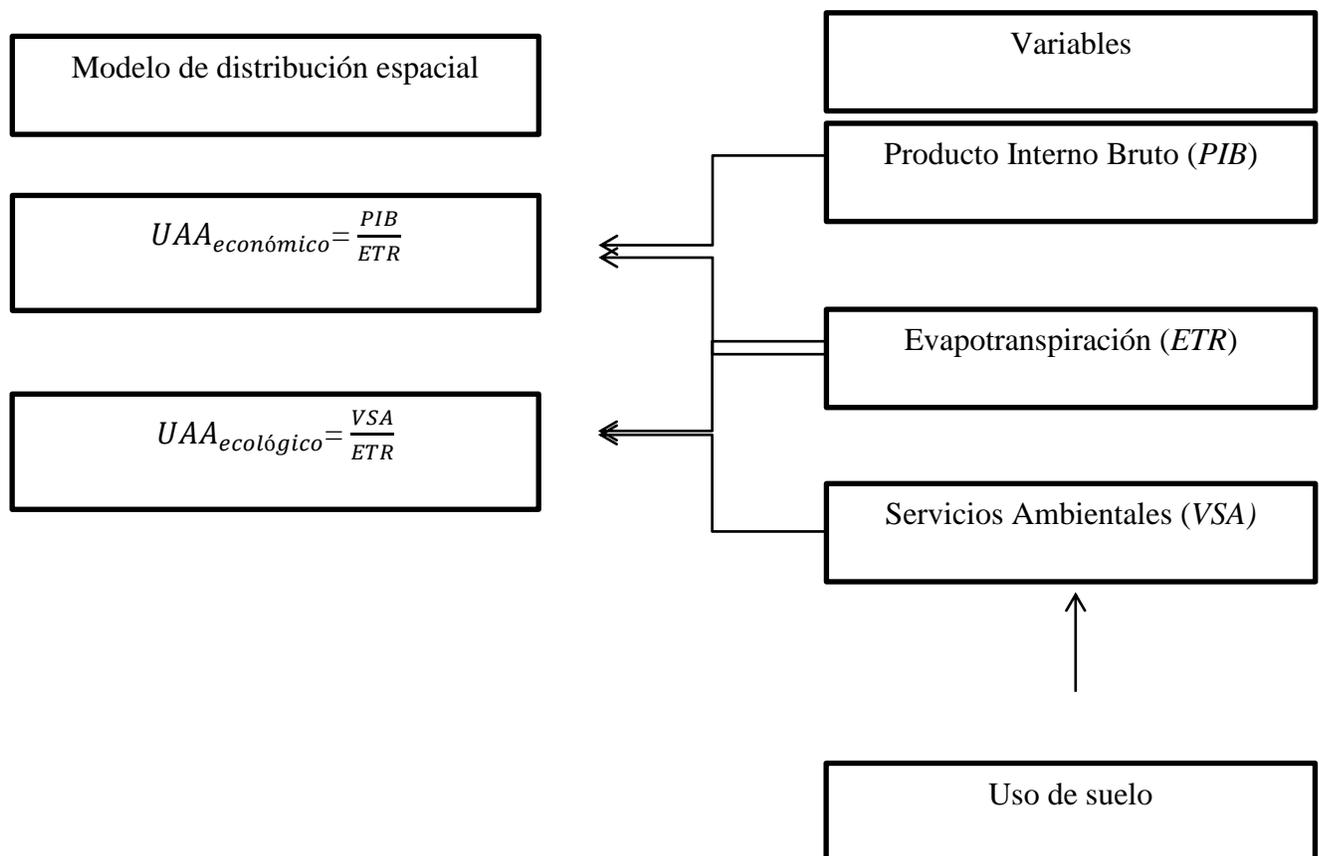


Figura 10. Esquema de la integración de las variables en el modelo de distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua ecológico y económico.

## **3.2. Determinación del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)**

El NDWI identifica las masas y cuerpos de agua en la superficie terrestre, así como el contenido de humedad en la vegetación o el suelo (Camaño, 2012). Este índice fue propuesto por McFeeters en el año de 1996 para detectar las aguas superficiales en ambientes húmedos, y determinar la extensión superficial de los mismos (McFeeters, 2013). Se calcula a partir de imágenes satelitales mediante la información de reflectancia de una superficie, a través de las diversas bandas de frecuencia del espectro electromagnético (Gao, 1996). Ha sido utilizado primordialmente en ciencias ambientales, agrícolas, forestales, hídricas, geológicas, climáticas, prevención de desastres naturales, etc.

Los valores del índice se obtienen a partir de la ecuación 3. Se trata de un cociente de las bandas infra-rojas del espectro electromagnético. La banda del infrarrojo cercano (NIR) y la banda Infrarrojo corto (SWIR).

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Ecuación 3. Fórmula matemática del NDWI

Los valores del índice poseen un rango de -1 a +1. Los valores menores a cero son superficies sin presencia de vegetación o agua, y mientras el número sea más positivo o cercano a uno, mayor será el contenido de agua en la superficie.

### **3.2.1. Análisis del NDWI de los diferentes periodos de estudio (Lluvias-Secas)**

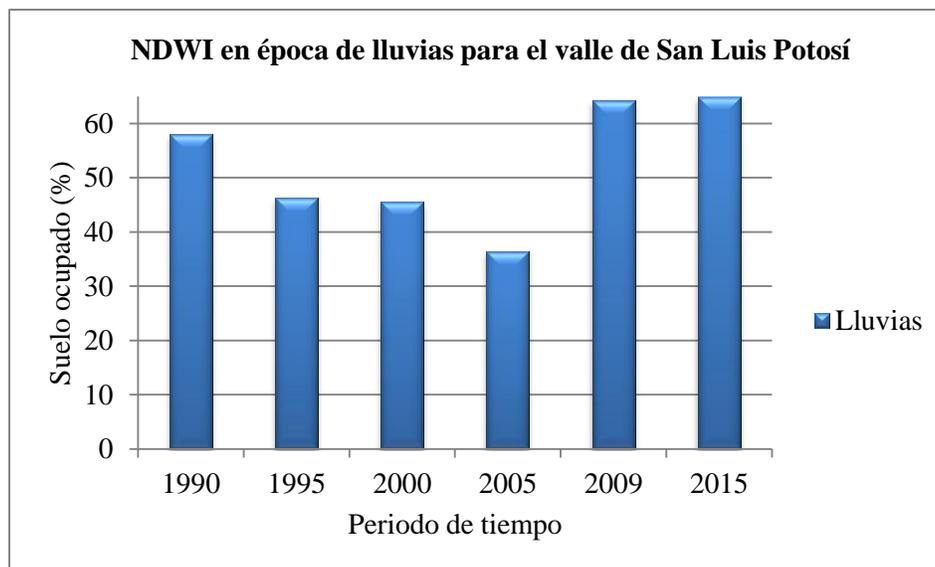
El NDWI fue procesado en el software de ENVI 4.7 para las imágenes Landsat 5 TM y ENVI 5.1 para las imágenes Landsat 8 OLI. Los años de análisis corresponde a 1990, 1995, 2000, 2005, 2009 y 2015. De cada año se estudió dos fechas correspondientes a la época de lluvias (mayo-septiembre) y la época de secas (octubre-abril).

Primeramente se analizan los resultados obtenidos de NDWI para la época de lluvias, que indican que las zonas de mayor concentración de humedad se ubican en la parte norte y centro, que corresponden a la zona urbana de la capital potosina y las zonas de cultivo de Soledad de Graciano Sánchez. Sin embargo los años 2009 y 2015 son considerados anómalos, debido a que se presenta un exceso de humedad a lo largo del área de estudio.

Los resultados obtenidos del cálculo del NDWI para la época de secas, indican que las zonas de mayor concentración de humedad se ubican en la parte sur del valle de San Luis Potosí, correspondientes a la Sierra de San Miguelito. Sin embargo los años de 2009 y 2015 son

considerados nuevamente anómalos, ya que existe un aumento de la concentración de humedad en el área de estudio a excepción de la Sierra de San Miguelito.

Una posible explicación a estas anomalías es la presencia del fenómeno del niño durante estos periodos. El Servicio Meteorológico Nacional tiene registrado que para los años de 2009 y 2015 se tuvo presencia de niño en el territorio nacional. En México el fenómeno del niño, tiende a generar condiciones de sequías durante el verano, e inviernos húmedos y fríos. Para el año 2009 y 2015 se registró un niño moderado que suele formar condiciones húmedas en el noroeste, centro y sur de México durante la época de verano (SMN, 2018). Aunque el fenómeno del niño podría haber influido en el comportamiento de la humedad en el área de estudio, se necesita explorar otros factores (climáticos, bióticos, antropogénicos, etc.) que pudieron impactar en la variable analizada. En las Gráficas 1 y 2 se presenta el comportamiento del NDWI en el área de estudio, para la época de lluvias y secas.



Gráfica 1. Comportamiento del NDWI en las últimas tres décadas en época de lluvias.

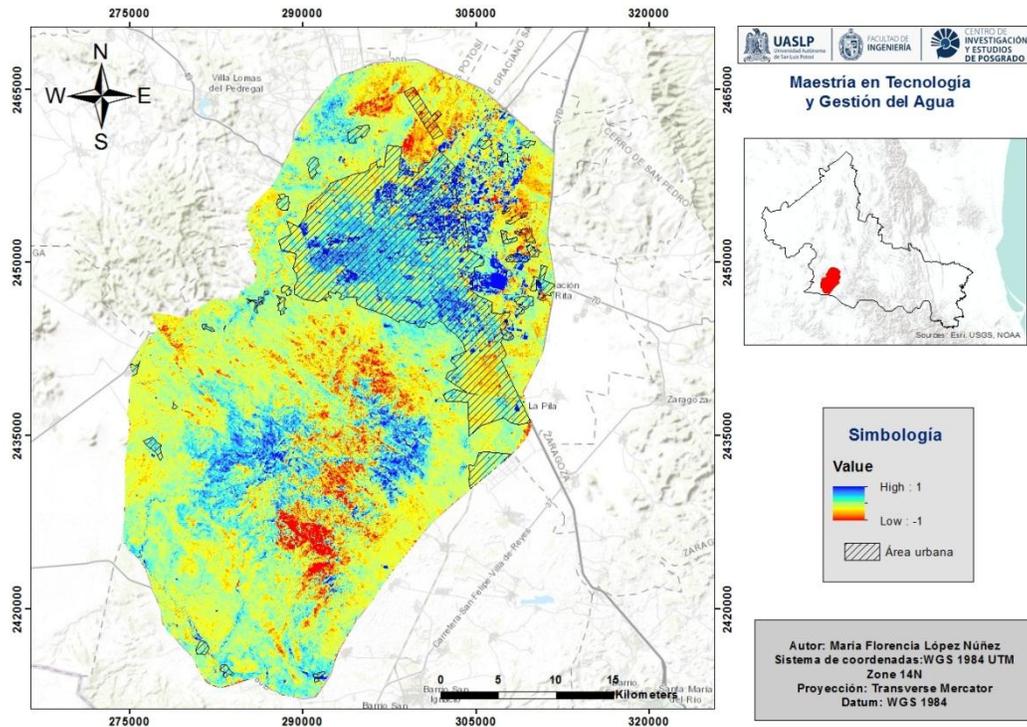


Figura 11. NDWI para época de lluvia, 1990.

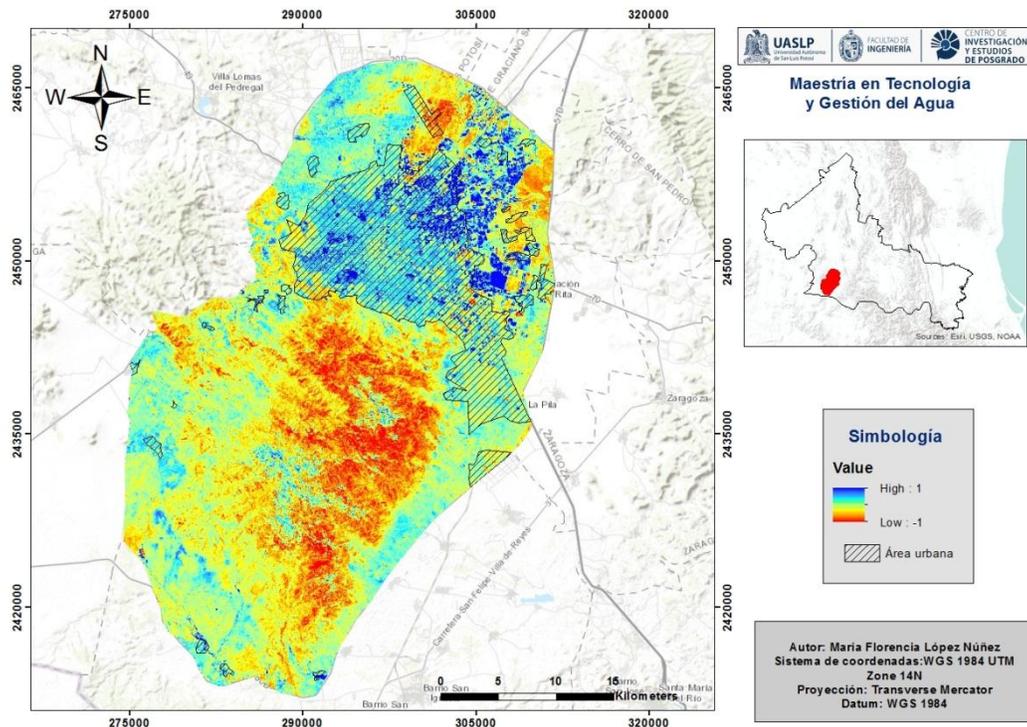


Figura 12. NDWI para época de lluvia, 1995.

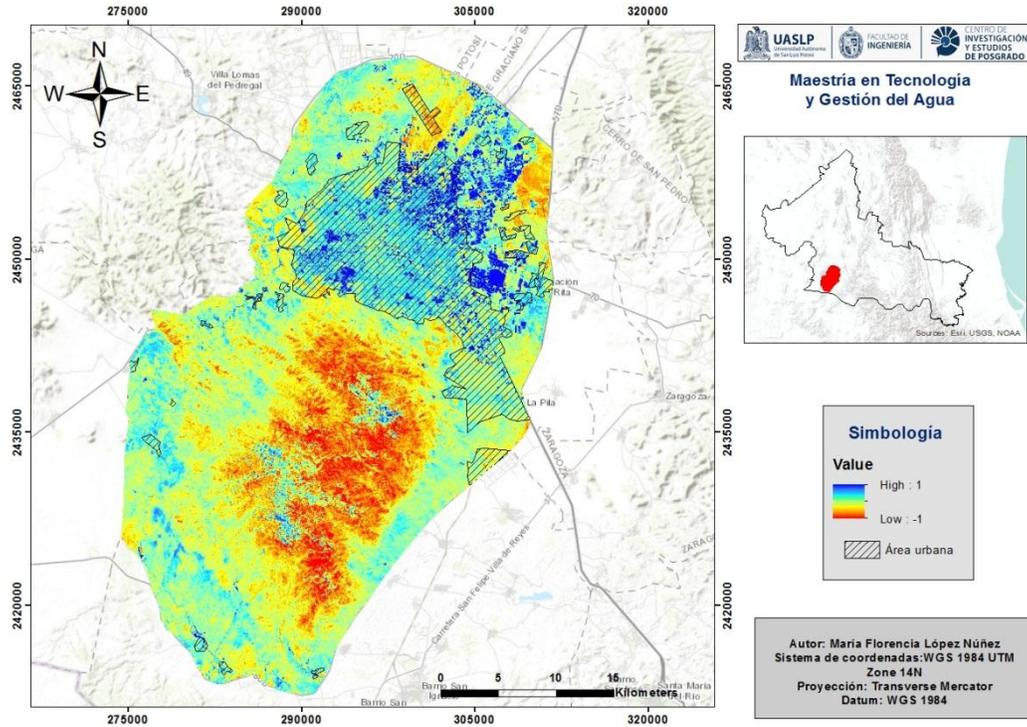


Figura 13. NDWI para época de lluvia, 2000.

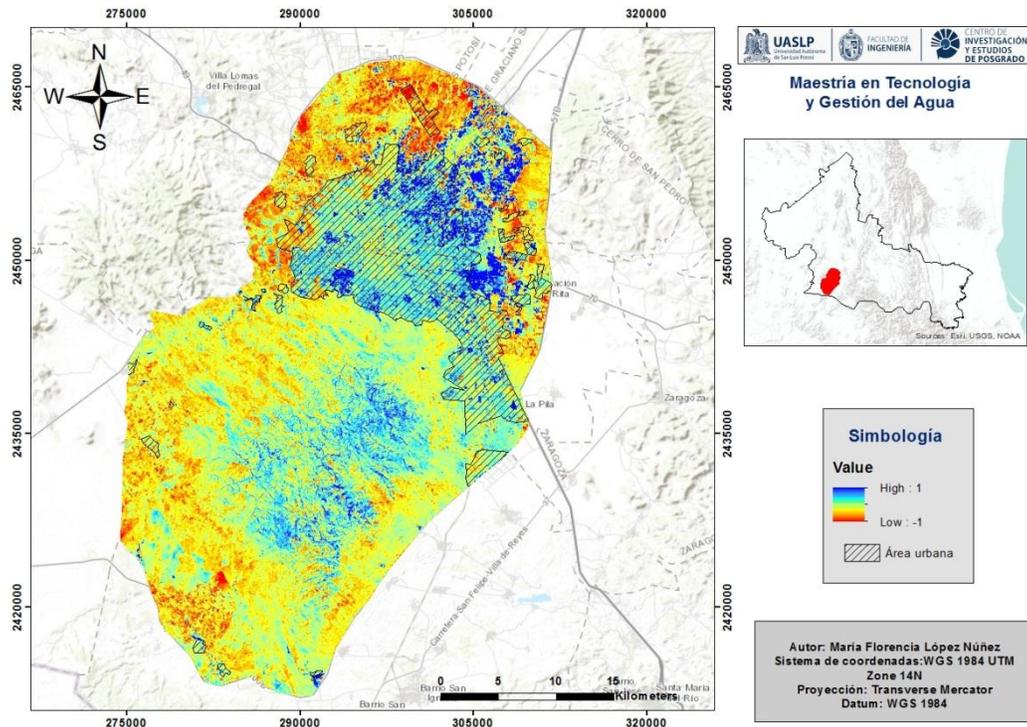


Figura 14. NDWI para época de lluvia, 2005.

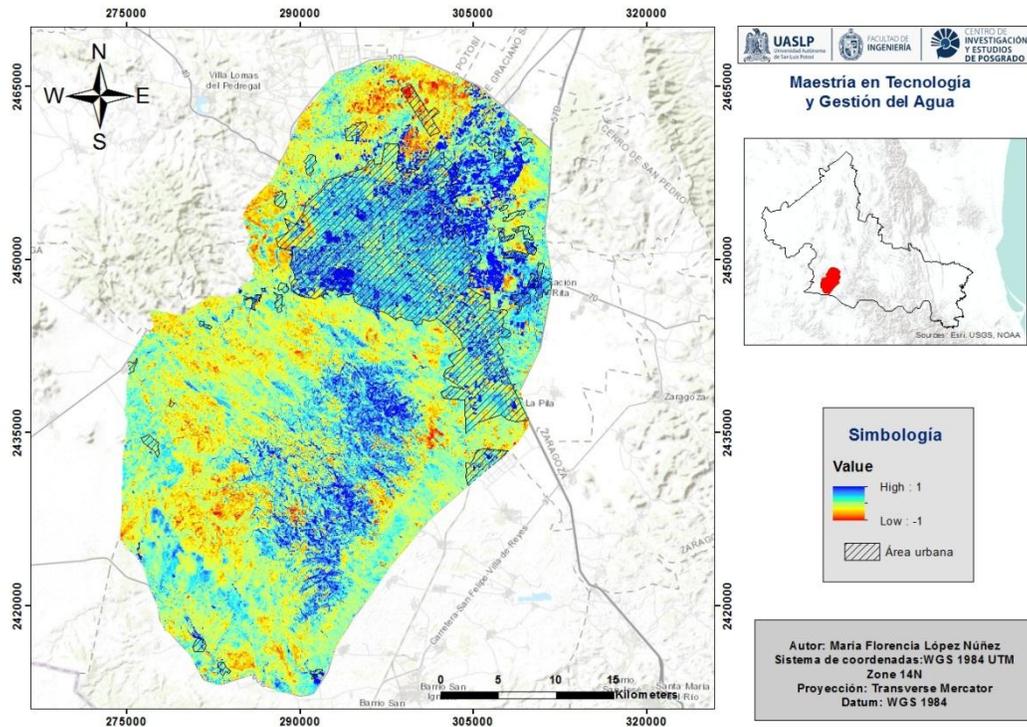


Figura 15. NDWI para época de lluvia, 2009.

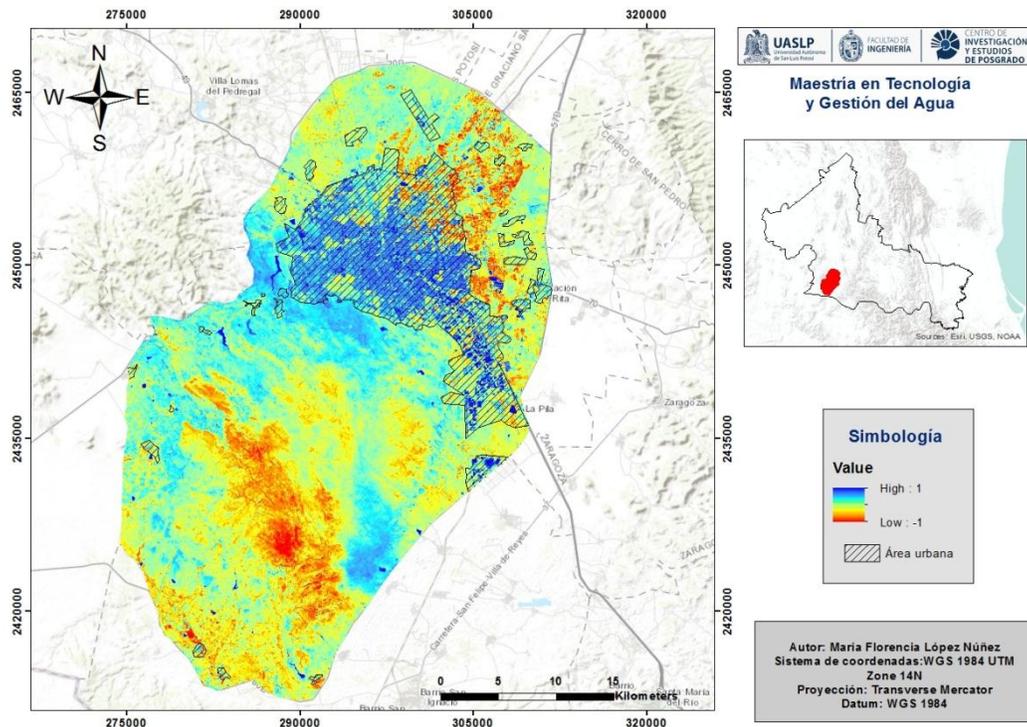
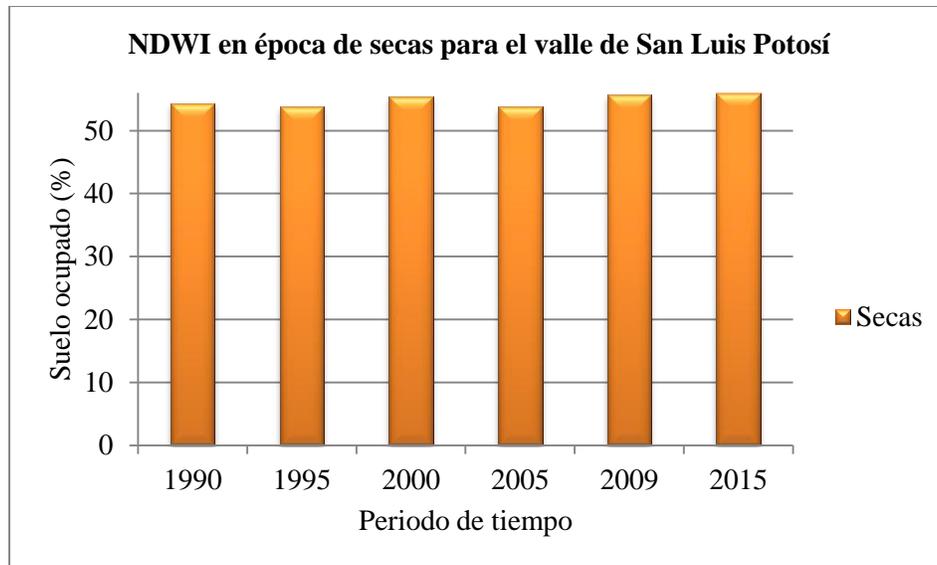


Figura 16. NDWI para época de lluvia, 2015.



Gráfica 2. Comportamiento del NDWI en las últimas tres décadas en época de secas.

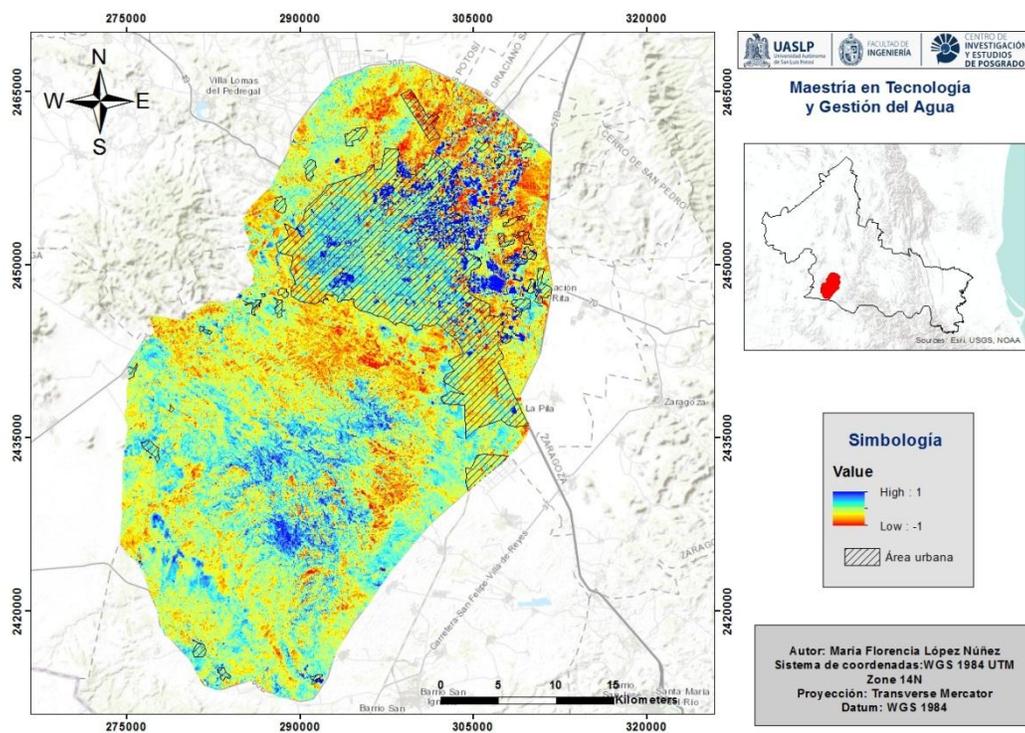


Figura 17. NDWI época de seca, 1990

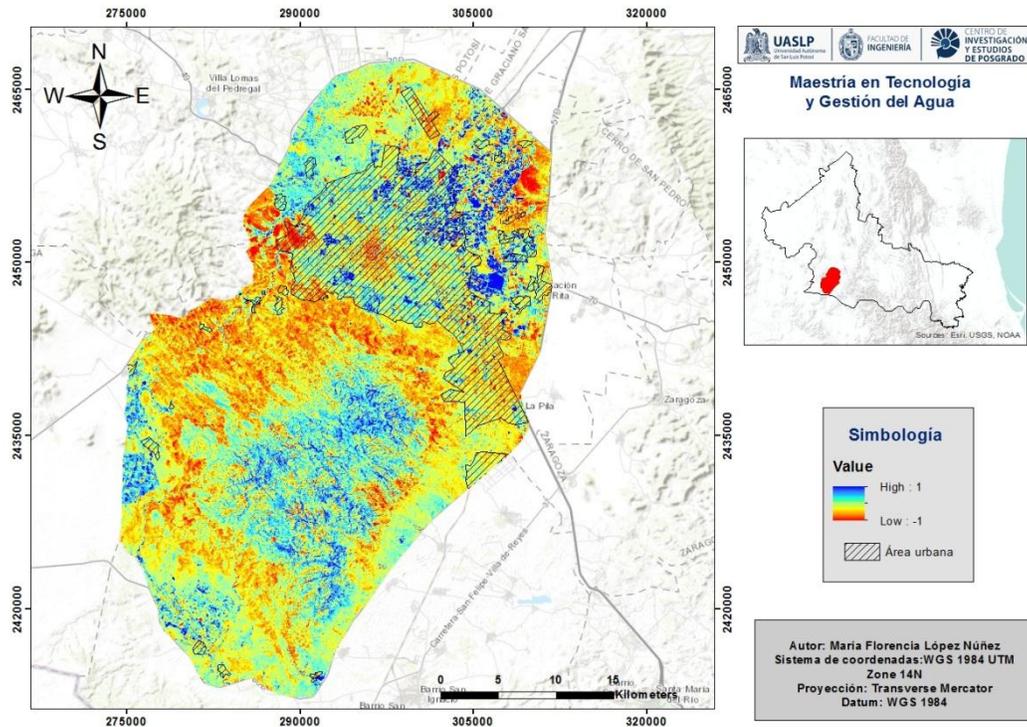


Figura 18. NDWI época de secas, 1995.

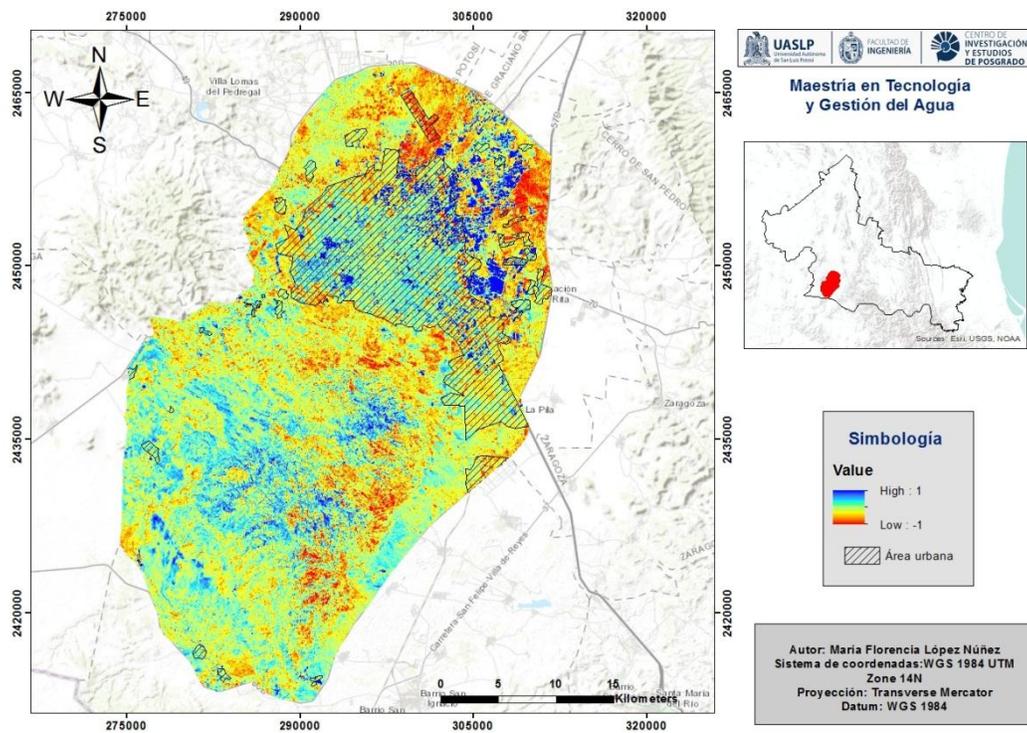


Figura 19. NDWI época de secas, 2000.

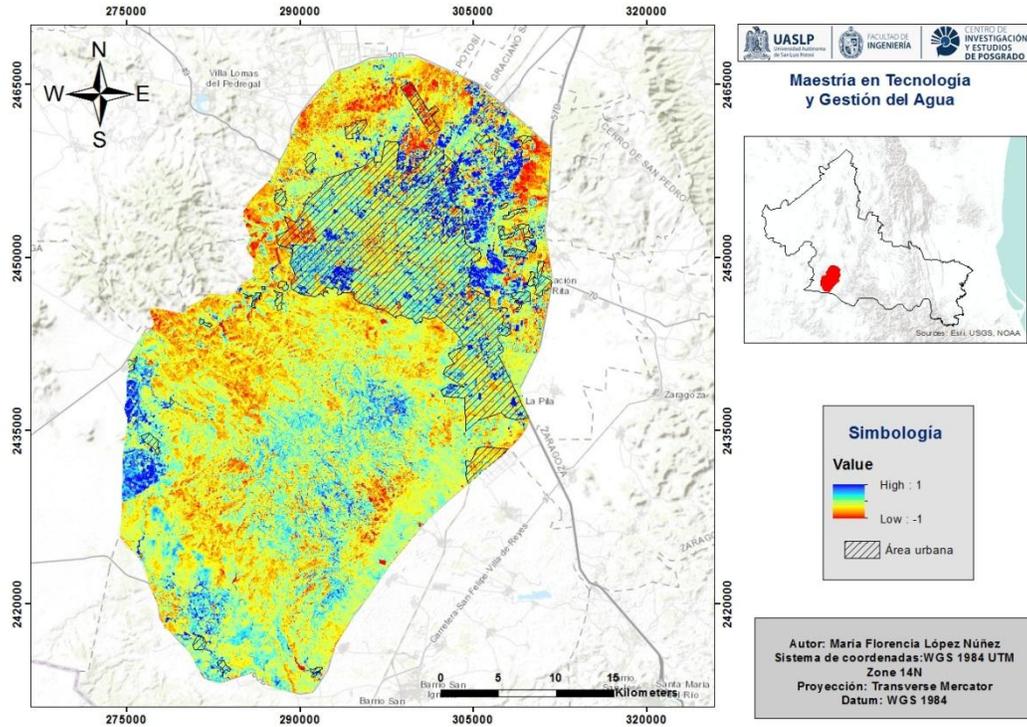


Figura 20. NDWI época de secas, 2005.

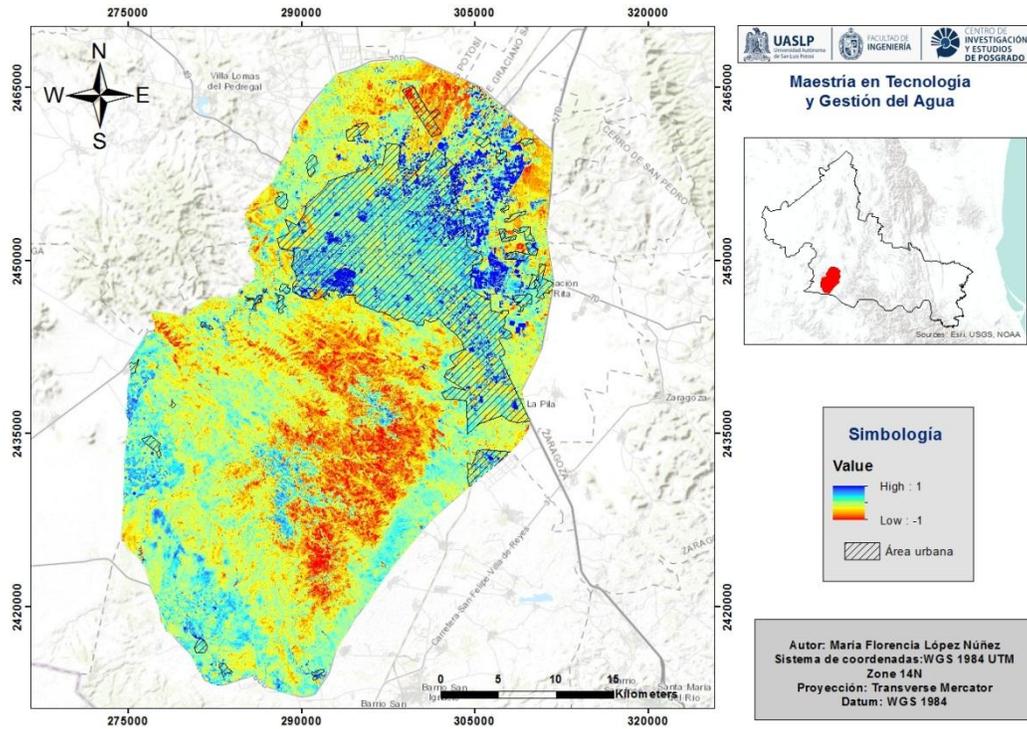


Figura 21. NDWI época de secas, 2009.

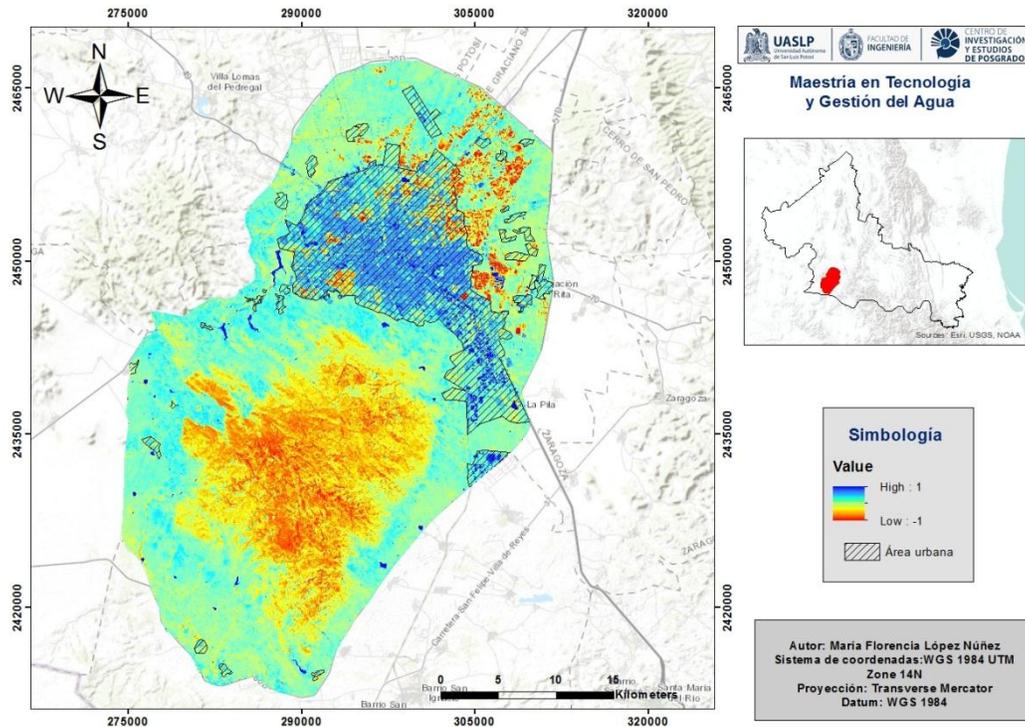


Figura 22. NDWI época de secas, 2015.

### 3.3. Cálculo de la evapotranspiración para el valle de San Luis Potosí en los diversos periodos determinados

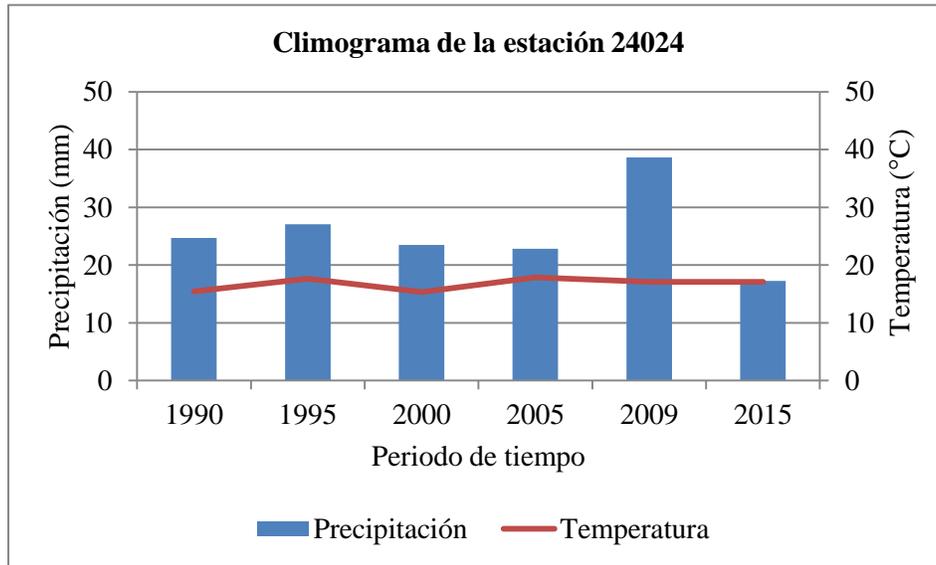
La evapotranspiración es el proceso mediante el cual el agua que ha precipitado en la superficie terrestre, es reintegrada a la atmósfera en forma de vapor de agua a través de dos procesos: la evaporación directa de humedad del suelo, junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Ocampo (2011) define a la evapotranspiración como “un componente clave del balance hídrico y además un término de relevancia en el balance energético que se da entre la atmósfera y la tierra”. La variable de evapotranspiración fue calculada mediante los datos de las estaciones meteorológicas mencionadas en el capítulo 2. La estimación de la evapotranspiración se calculó a través del método de Turc. Este método es uno de los más usados y fue propuesto por L. Turc, a partir de la generación de balances hídricos en 254 cuencas, distribuidas en distintas regiones de Europa y África del norte. Obteniéndose la siguiente expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Ecuación 4. Método de Turc.

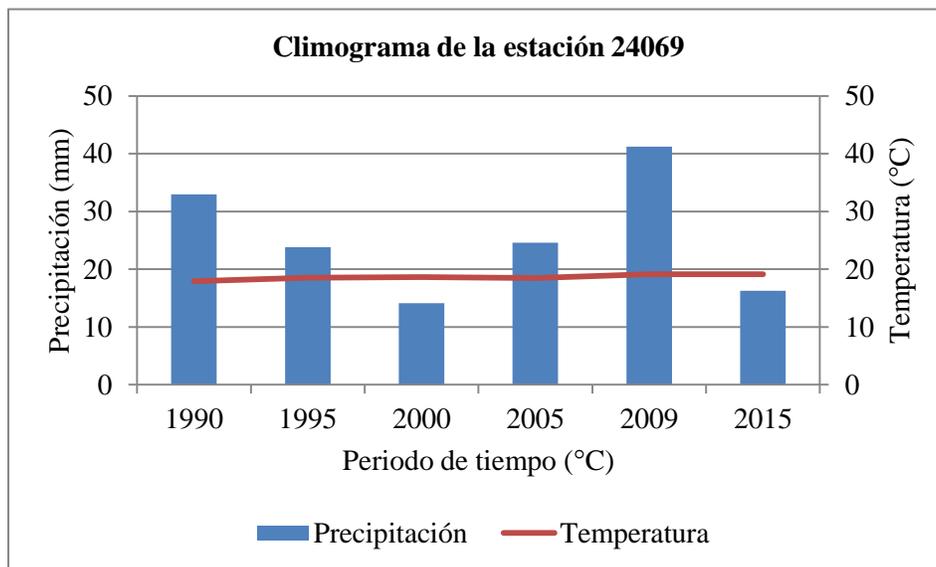
Siendo, P la precipitación media anual en mm,  $L = 300 + 25T + 0.05T^3$ , T es la temperatura media anual en °C y ETR la evapotranspiración real anual en mm.

La ecuación de Turc tiene como base la precipitación y temperatura para la obtención de la Evapotranspiración Real (ETR). El cálculo de la ETR se rige bajo el principio de condiciones reales, considerando que la cobertura vegetal no siempre es completa (Méndez, 2017). Como primer paso se generó un análisis de la precipitación y temperatura para cada estación meteorológica, con el fin de identificar los patrones de comportamiento en las últimas tres décadas para el valle de San Luis Potosí. A continuación se muestran los resultados obtenidos.



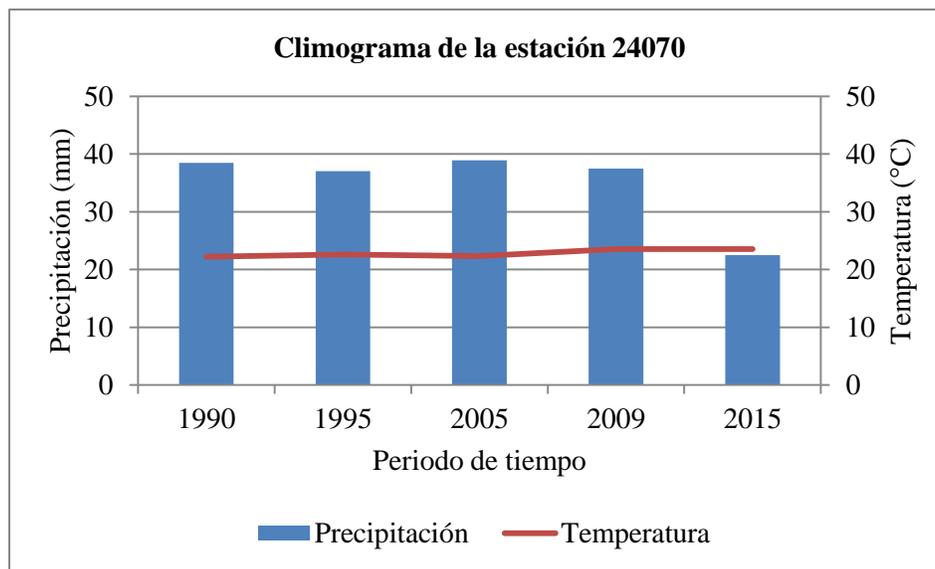
Gráfica 3. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24024.

La estación 24024 ubicada en las cercanías de la Presa de San José, presenta valores de temperatura en un rango de 15 a 18 °C según sus registros. Los valores de precipitación van en un rango de 20 a 30 mm, a excepción del año 2009 que llegó a presentar valores de hasta 38 mm de precipitación.



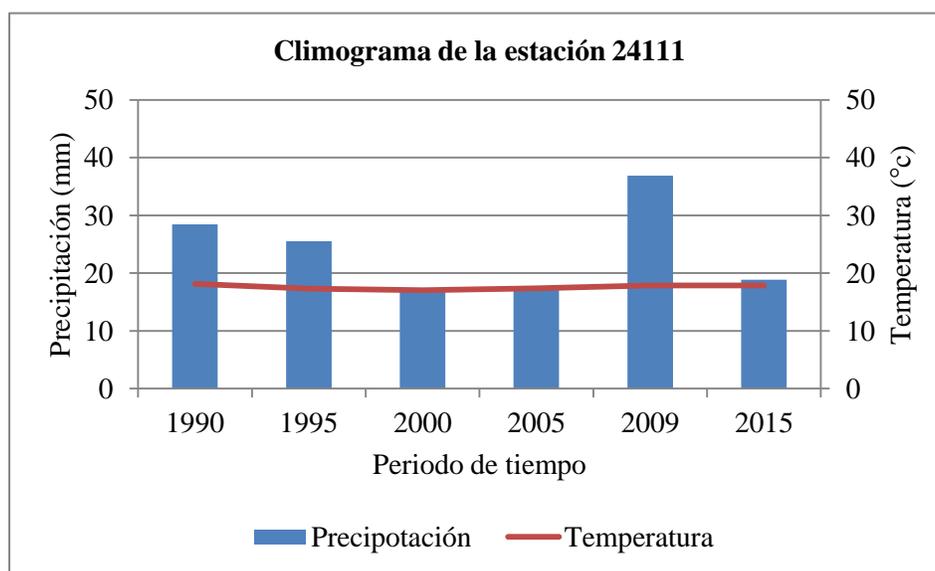
Gráfica 4. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24069.

La estación 24069 ubicada en el centro de la ciudad de San Luis Potosí, presenta valores de temperatura en un rango de 17 a 20 °C. En cuanto a los valores de precipitación son muy variables, ya que van en un rango de 17 a 41 mm. El año 2009 nuevamente es el año con un mayor registro de precipitación.



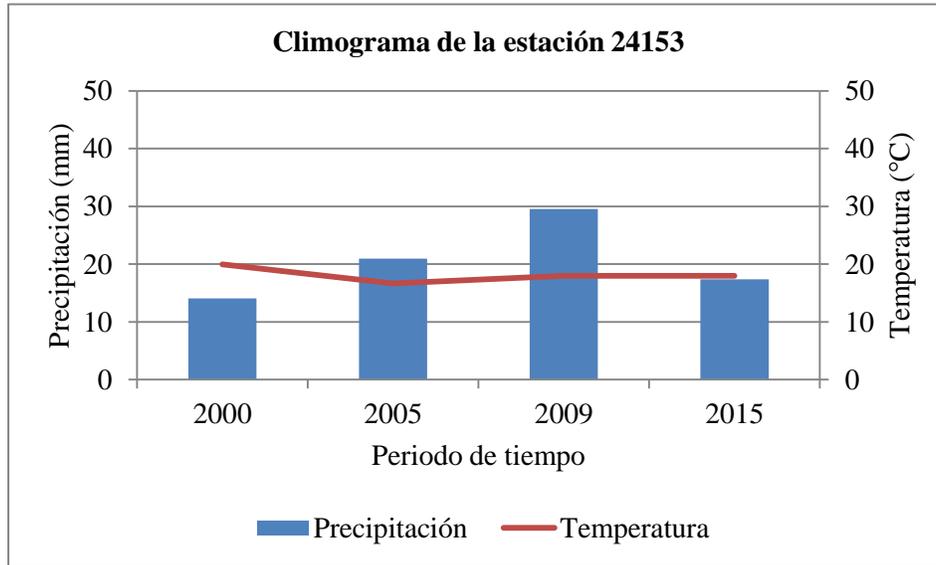
Gráfica 5. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24070.

La estación 24070 ubicada en las cercanías de la carretera No. 49 San Luis-Zacatecas presenta valores de temperatura semejantes a lo largo de las tres décadas, con un rango de 22 a 23 °C según sus registros. Los valores de precipitación están en un rango de 22 a 39 mm. El año 2005 es el año que presenta un valor de precipitación mayor.



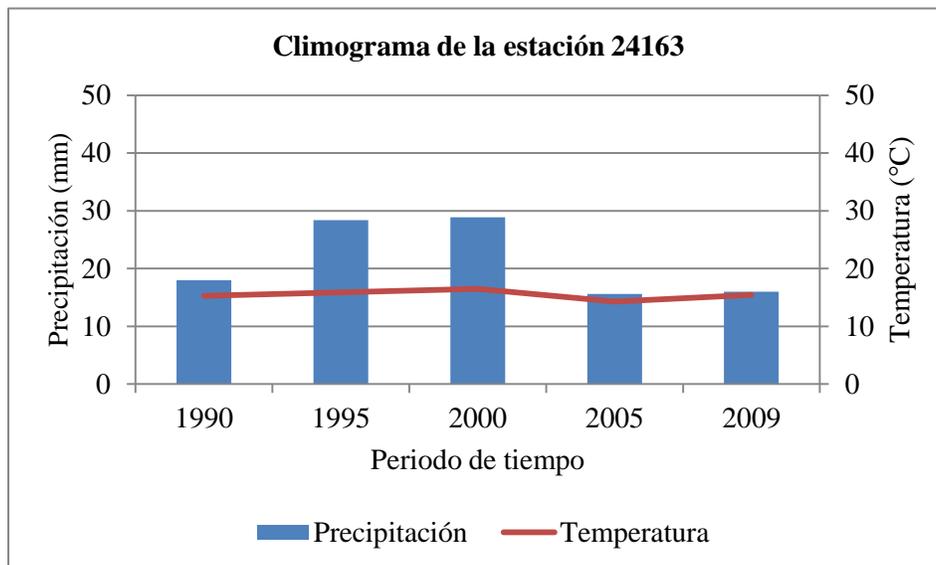
Gráfica 6. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24111.

La estación 24111 está ubicada en el centro de la ciudad de San Luis Potosí, al igual que la estación 24069. Presenta valores de temperatura semejantes a lo largo de las tres décadas, con un rango de 17 a 18 °C según sus registros. Los valores de precipitación van en un rango de 17 a 36 mm. El año con un mayor registro de precipitación es el 2009 con un valor por arriba de los 36 mm de precipitación.



Gráfica 7. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24153.

La estación 24153 ubicada en las cercanías al Aeropuerto Internacional Ponciano Arriaga presenta valores de temperatura en un rango de 16 a 19 °C según sus registros. Los valores de precipitación van en un rango de 14 a 30 mm. El año 2009 tiene el registro de precipitación más alta.



Gráfica 8. Valores de precipitación y temperatura para la estación 24163.

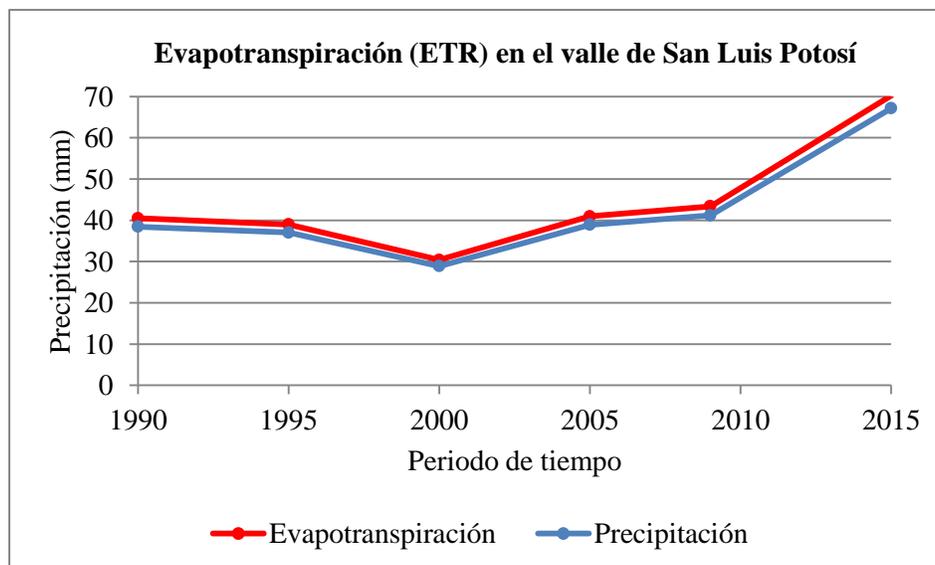
La estación 24163 ubicada en el sur del área de estudio en la comunidad de Bledos presenta valores en un rango de 14 a 16 °C. En cuanto a su precipitación tiene valores que van en un rango de 15 a 28 mm. El año con mayor registro de precipitación es para el año 2000 con un valor de 28.85 mm.

Con este primer análisis respecto a la precipitación y temperatura, se tienen identificados los años que presentan los valores más bajos (año 2000) y altos de precipitación (año 2009) para distintas estaciones. El año 2009 concuerdan con los resultados que nos arrojó el NDWI, donde este año era considerado anómalo debido al aumento de humedad en la zona de estudio.

### 3.3.1. Análisis de la presencia de evapotranspiración en los diferentes periodos de estudio

Con base a los cálculos de ETR para cada estación, se procedió a realizar el análisis geoestadístico para los años de 1990, 1995, 2000, 2005, 2009 y 2015. Para esta variable se utilizó el método de interpolación de IDW, que dio como resultado la estimación de una superficie continua de valores de ETR a lo largo del valle de San Luis Potosí.

Los resultados del cálculo de evapotranspiración indican que las zonas con mayor concentración de evapotranspiración, son ubicadas en la parte noroeste del valle de San Luis Potosí. El año del 2000 es considerado un año anómalo debido a que las zonas de mayor concentración fueron ubicadas en la parte sur del área de estudio. Se tiene registro de que en este año se presentó un evento Niña, el cual genera lluvias excesivas en el centro y sur del país y en contraposición sequias en el norte de México. En la Gráfica 9 se muestra el comportamiento de la evapotranspiración y precipitación en el área de estudio.



Gráfica 9. Comportamiento de la evapotranspiración en las últimas tres décadas.

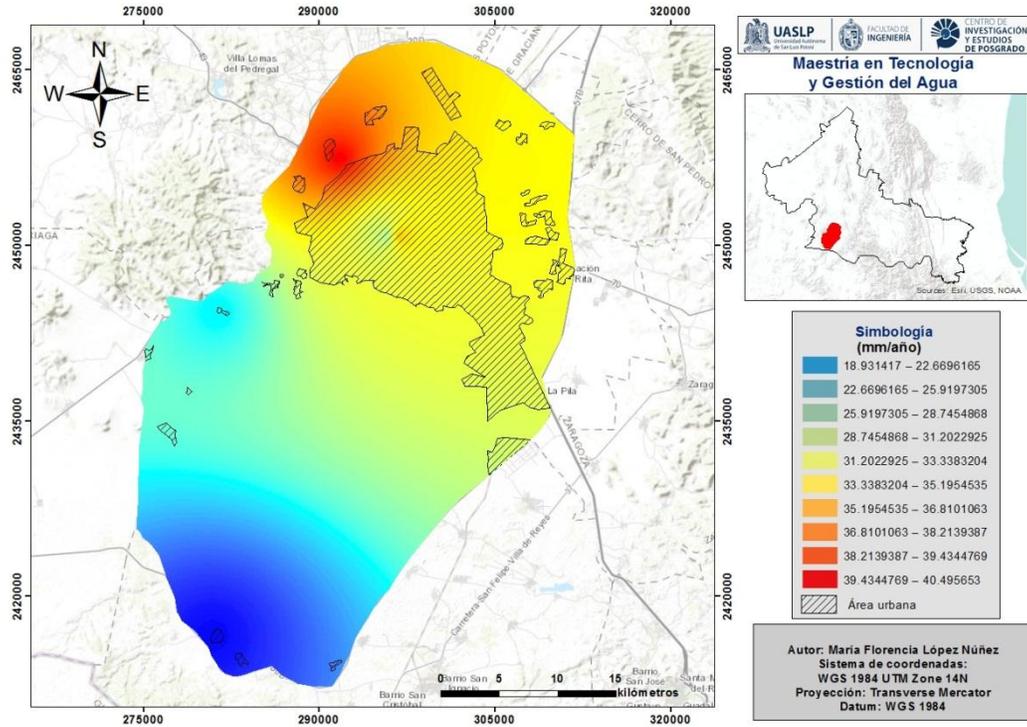


Figura 23. Evapotranspiración 1990

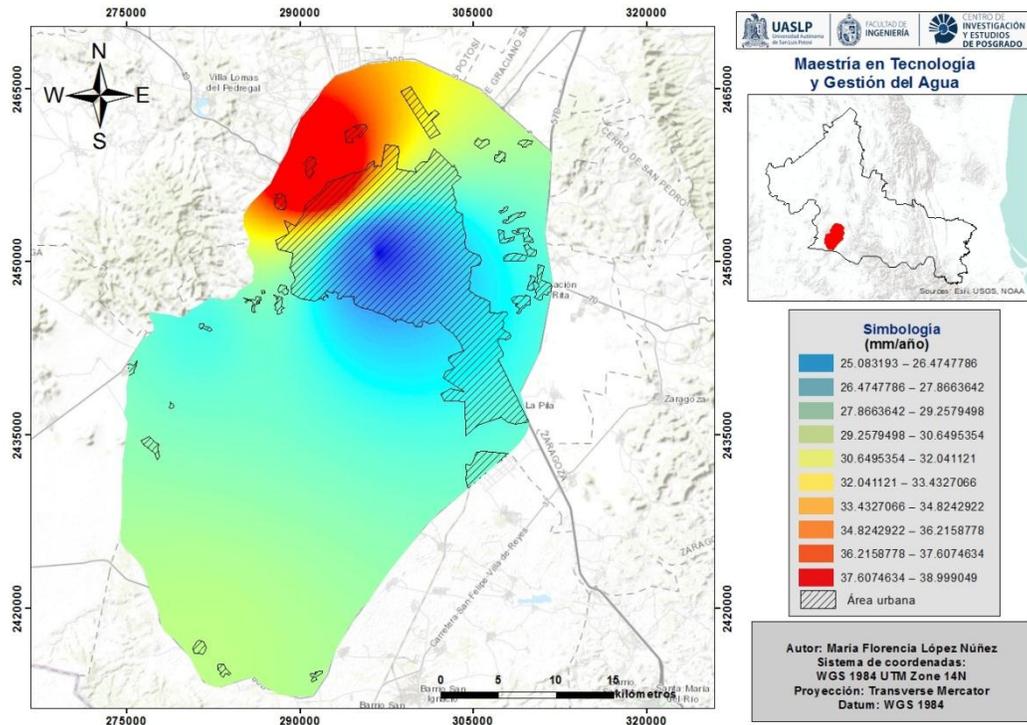


Figura 24. Evapotranspiración 1995.

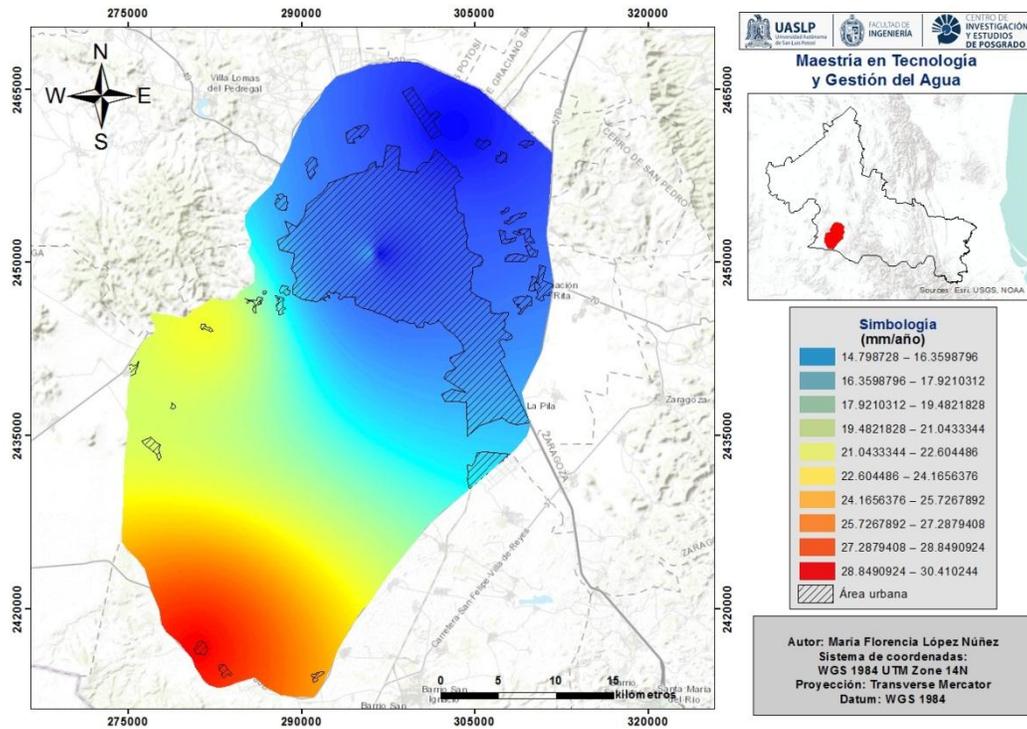


Figura 25. Evapotranspiración 2000.

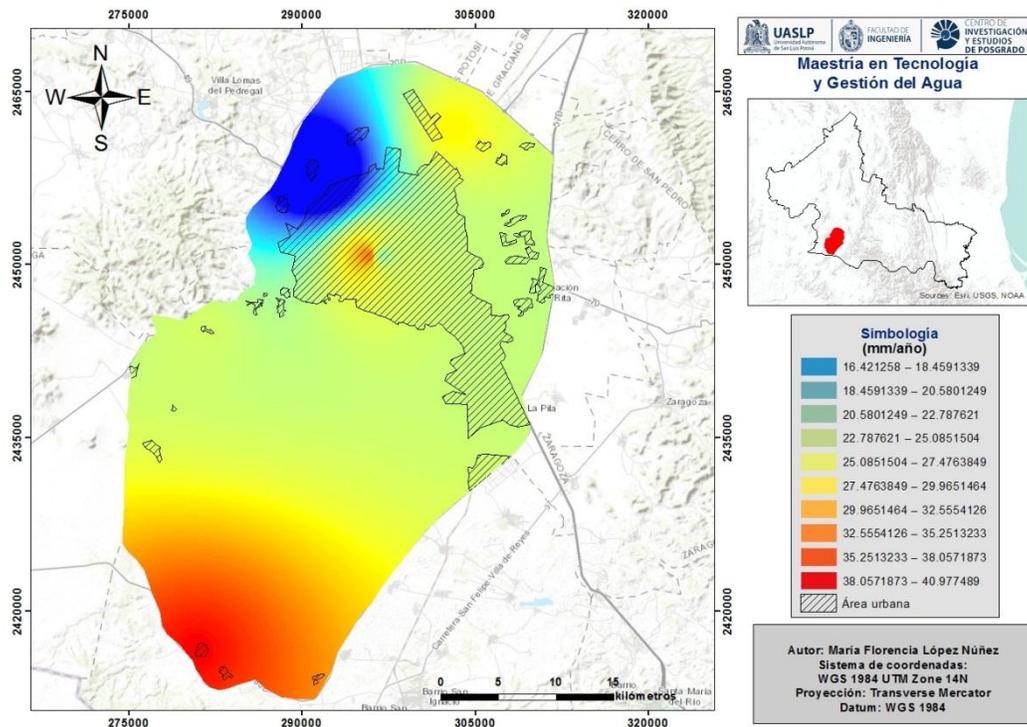


Figura 26. Evapotranspiración 2005.

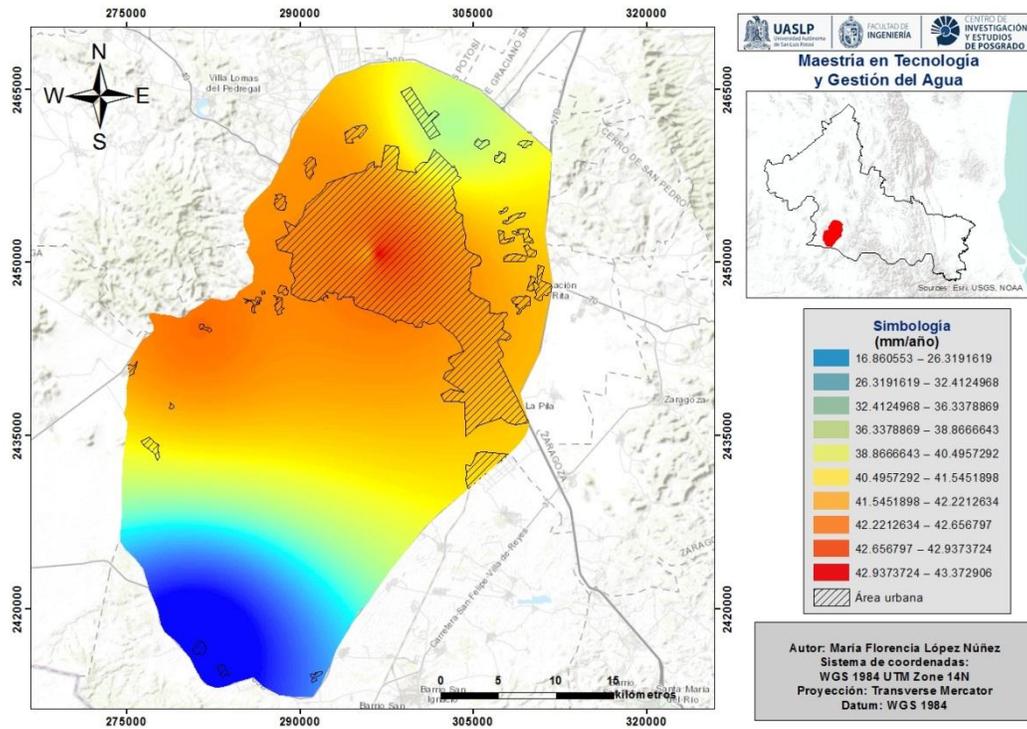


Figura 27. Evapotranspiración 2009.

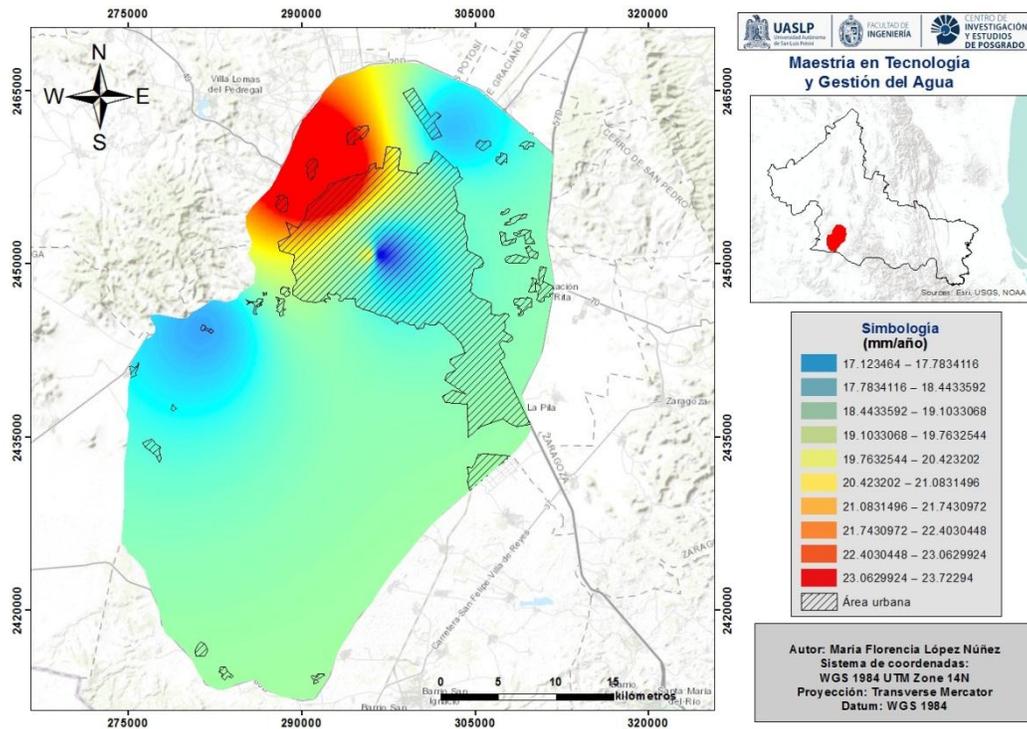


Figura 28. Evapotranspiración 2015.

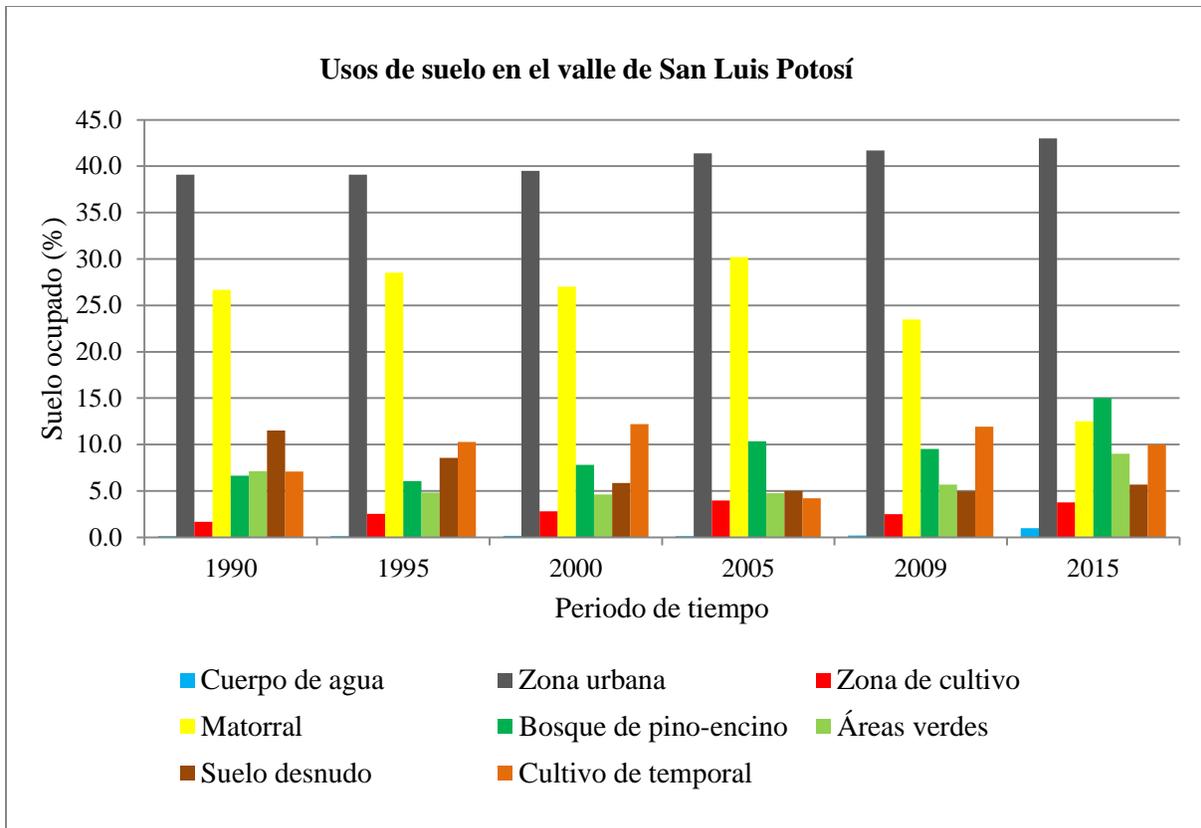
### **3.4. Proceso de clasificación supervisada al conjunto de datos vectoriales y matriciales de la cartografía del uso de suelo**

La variable de uso de suelo fue obtenida a través de las imágenes satelitales Landsat 5 TM y 8 OLI. Estas imágenes se sometieron a las técnicas de corrección radiométrica y atmosférica ya mencionados en el Capítulo 2. Enseguida, se realizó el proceso de clasificación digital de la imagen. La clasificación digital engloba la transformación de una imagen continua a otra categorizada temáticamente, a partir de la agrupación de los niveles digitales espectralmente similares (Chuvieco, 1985).

La clasificación digital se divide en dos grupos: a) clasificación supervisada y b) clasificación no supervisada. En este trabajo se utilizó la clasificación supervisada, la cual presenta como principal característica el conocimiento previo de la zona de estudio por parte del investigador. Con el objetivo de delimitar zonas representativas de los usos y coberturas del suelo en determinadas clases, y posteriormente utilizarlas como áreas de entrenamiento. La clasificación se realizó con base en las siguientes clases: cuerpo de agua, zona urbana, zona de cultivo, matorral, bosque de pino-encino, áreas verdes, suelo desnudo y cultivo de temporal. Posteriormente se utilizó el algoritmo de máxima verosimilitud como un indicador de la certeza de la clasificación. El algoritmo de máxima verosimilitud infiere que los datos siguen una función de distribución normal para asignar la probabilidad de que un pixel cualquiera pertenezca a cada una de las clases (Universidad de Murcia, 2003). El pixel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca. El proceso de clasificación digital se llevó a cabo en el software de ENVI 5.3.

#### **3.4.1. Análisis de la clasificación de uso de suelo en los diferentes periodos de estudio**

El análisis del uso de suelo en las últimas tres décadas en el valle de San Luis Potosí ha permitido identificar los patrones de cambio y coberturas del uso de suelo. Como resultado se identificó que el uso de suelo urbano ha aumentado continuamente, de hecho para el año 2015 ocupa el 43 % de superficie dentro del área de estudio. Las zonas de cultivo disminuyeron en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez, sin embargo emergieron nuevas regiones de cultivo pertenecientes a los ejidos de Bledos y Carranco en el municipio de Villa de Reyes, así como el poblado de San Sebastián y Pozuelos del municipio de San Luis Potosí. Las coberturas de bosque de Pino-encino, matorral, áreas verdes y cultivo de temporal presentaron escenarios muy variantes en dependencia de las condiciones climáticas. El suelo desnudo presentó disminución de su cobertura a través del tiempo. Y por último la superficie ocupada por los cuerpos de agua no presentó grandes cambios, a excepción del año 2015 donde se presentó un aumento en su cobertura. Este último análisis es análogo a la condición que presenta el estudio del NDWI, ya que también muestra una mayor concentración de humedad respecto a otros años. En la Gráfica 10 se representan los porcentajes ocupados por cada uso de suelo.



Gráfica 10. Análisis histórico del uso de suelo en el valle de San Luis Potosí.

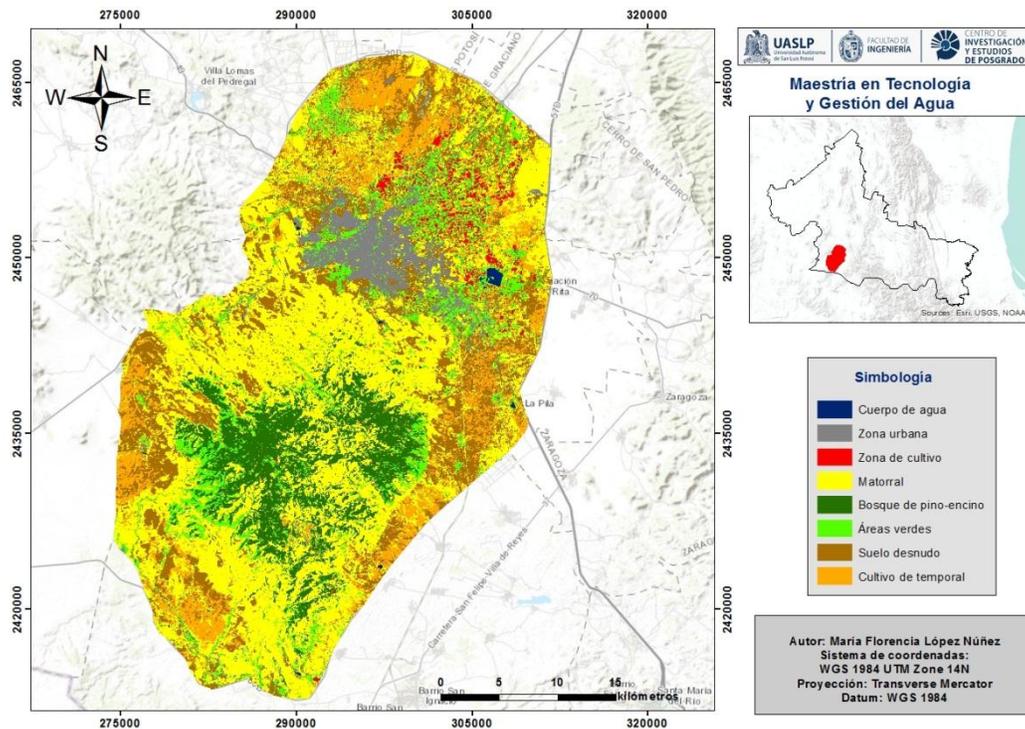


Figura 29. Uso del suelo 1990.

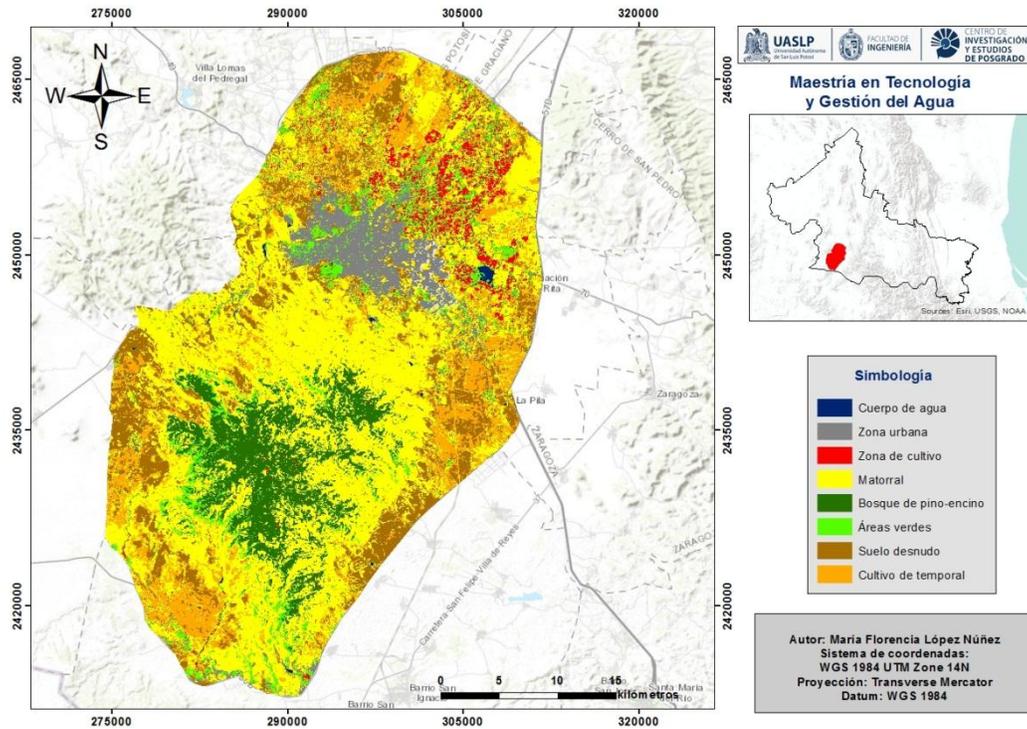


Figura 30. Uso del suelo 1995.

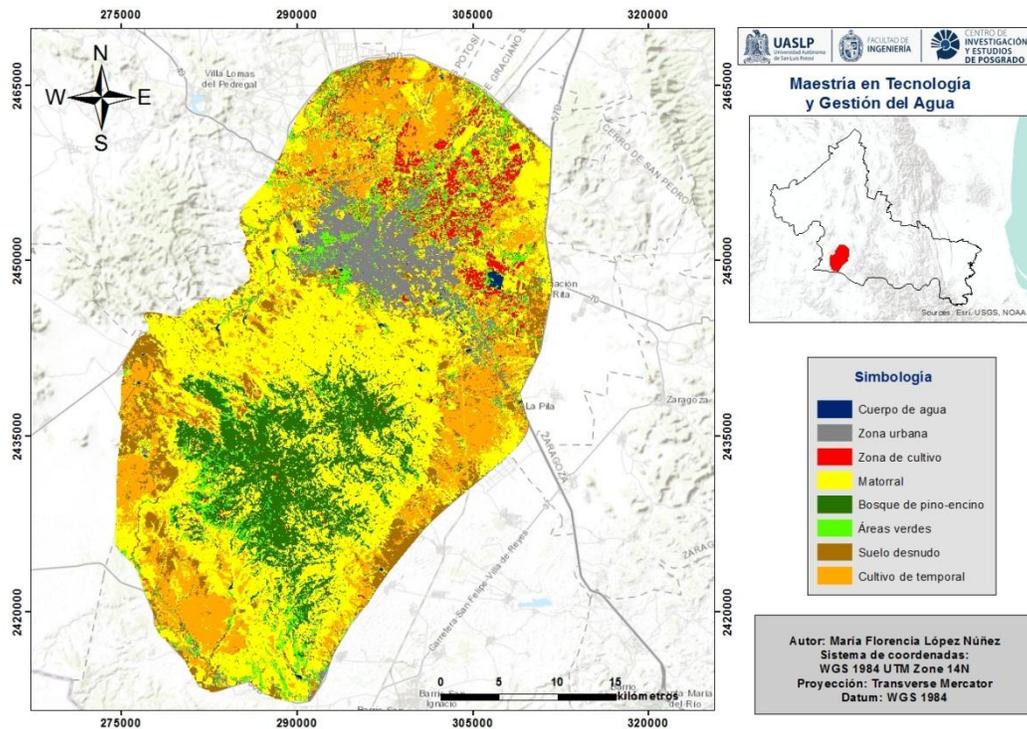


Figura 31. Uso del suelo 2000.

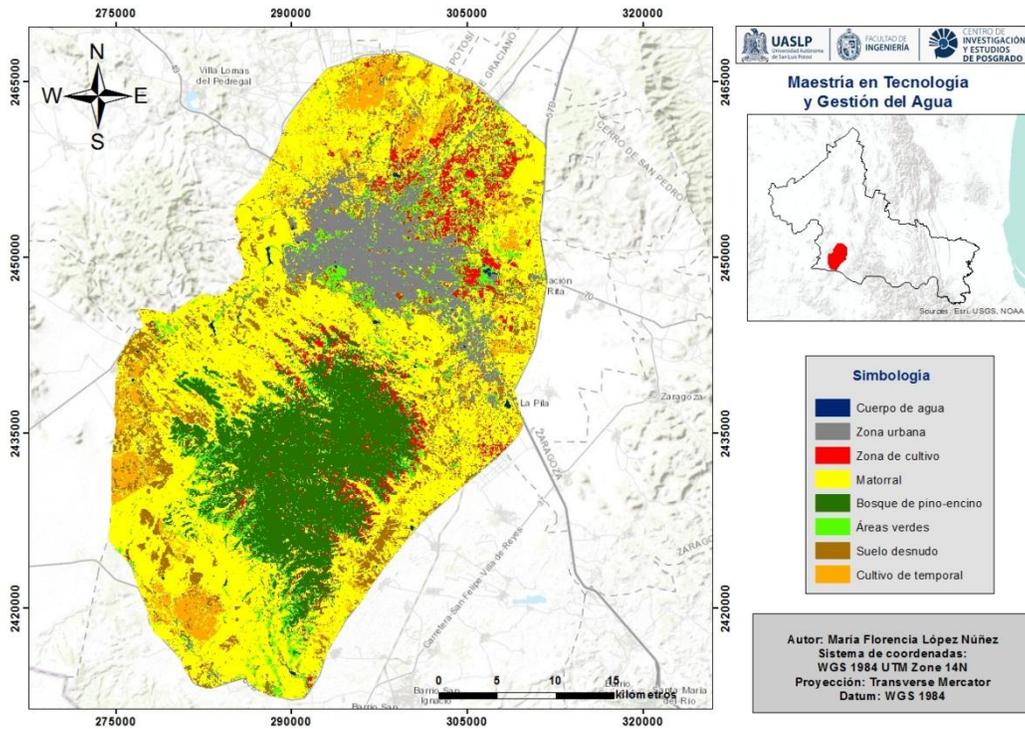


Figura 32. Uso del suelo 2005.

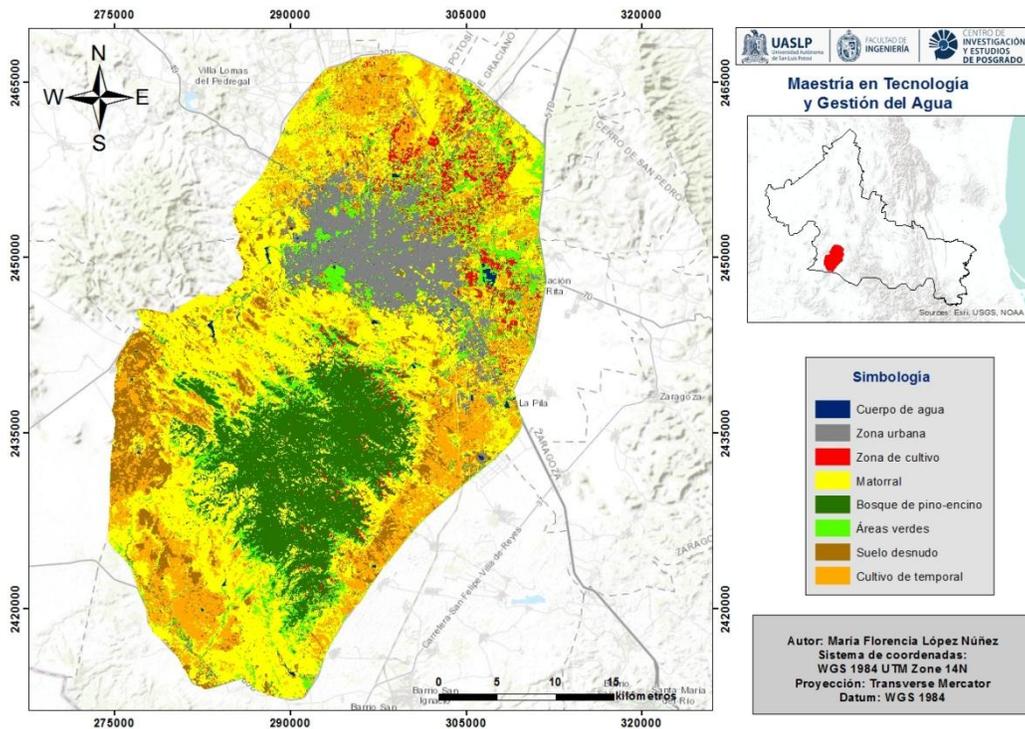


Figura 33. Uso del suelo 2009.

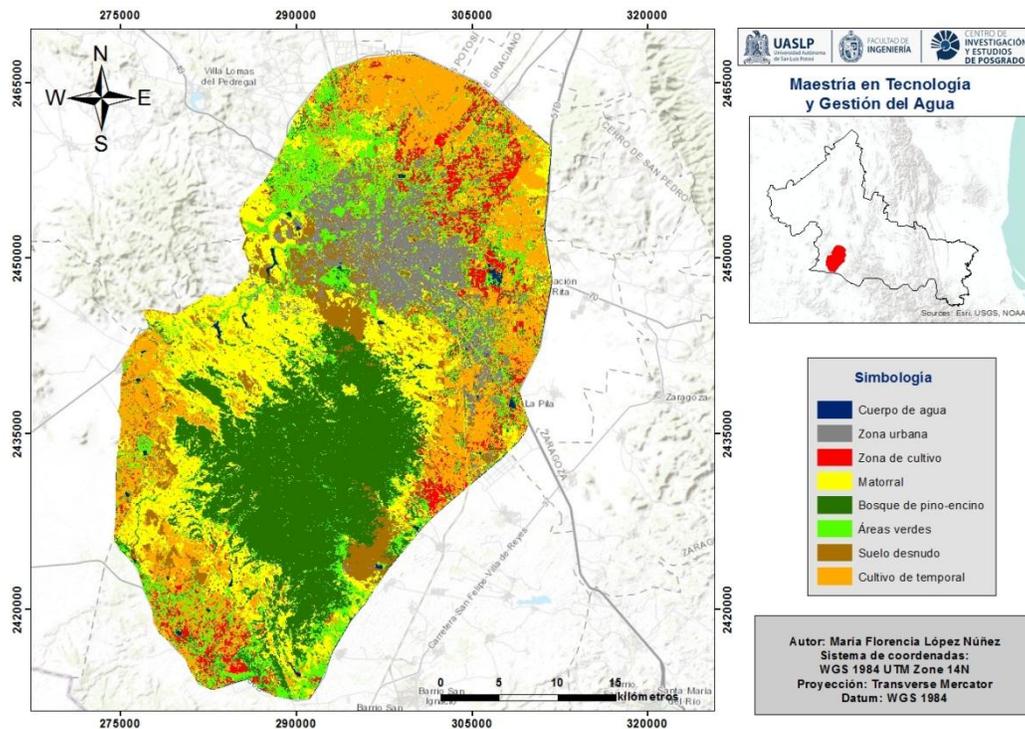


Figura 34. Usos del suelo 2015.

### 3.5. Análisis de la distribución espacial de las actividades económicas para determinar el Producto Interno Bruto (PIB)

El Producto Interno Bruto (PIB) es el valor monetario de los bienes y servicios finales producidos por una economía en un país o región durante un período determinado, normalmente de un año. Es un indicador representativo que ayuda a medir el crecimiento o decrecimiento de la producción de bienes y servicios de las empresas en cada país (Sánchez, 2016). La variable de PIB fue calculada para los años de 1990, 1995, 2000, 2005, 2009 y 2015, con base en los datos anuales que proporciona el INEGI para el estado de San Luis Potosí. También se tomaron datos del Directorio Estadístico de Unidades Económicas (DENU), con el objetivo de identificar y ubicar todas las empresas y establecimientos georreferenciados dentro del área de estudio. La variable del PIB relaciona la cantidad de agua que necesitan las actividades económicas para llevar a cabo sus procesos productivos y de esta manera asignar un valor monetario al volumen de agua destinado. Primeramente se procedió a identificar el tipo de actividades económicas en el valle de San Luis Potosí, en concordancia con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte (SCIAN) con el que actualmente se trabaja en México. En la Tabla 6 se muestra la clasificación de actividades económicas según el SCIAN.

Tabla 6. Clasificación del SCIAN de las actividades económicas.

Agrupación tradicional	Característica general de los sectores	Sector	
Actividades primarias	Explotación de recursos naturales	11	Agricultura, cría, y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza.
Actividades secundarias	transformación de bienes	21	Minería
		22	Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final.
		23	Construcción
		31-33	Industrias Manufactureras
Actividades terciarias	Distribución de bienes	43	Comercio al por mayor
		46	Comercio al por menor
		48-49	Transportes, correos y almacenamiento
	Operaciones con información	51	Información en medios masivos
	Operaciones con activos	52	Servicios financieros y de seguros
		53	Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles
		54	Servicios profesionales, científicos y técnicos
		55	Corporativos
		56	Servicios de apoyo a los negocios y de manejo de residuos y desechos, y de servicios de remediación
		61	Servicios educativos
		62	Servicios de salud y de asistencia social
	Servicios relacionados con la recreación	71	Servicios de esparcimiento culturales y deportivos y otros servicios recreativos
		72	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas
	Servicios residuales	81	Otros servicios excepto actividades gubernamentales
	Actividades gubernamentales	93	Actividades legislativas, gubernamentales, de impartición de justicia y de organismos internacionales y extraterritoriales

El valor del PIB para el valle de San Luis Potosí, se distribuyó teniendo en cuenta las actividades económicas que se llevan a cabo por cada región del valle y el porcentaje de contribución al indicador estatal como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Producto Interno Bruto histórico para el Estado de San Luis Potosí (INEGI, 2017).

Periodo	San Luis Potosí			
	Total de la actividad económica (millones de pesos)	Actividades primarias (millones de pesos)	Actividades secundarias (millones de pesos)	Actividades terciarias (millones de pesos)
1990	10,754,263	1,841,646	2,237,619	6,674,998
1991	14,066,238	1,988,641	3,614,257	8,463,340
1992	17,378,213	2,135,636	4,990,895	10,251,682
1993	20,690,188	2,282,631	6,367,533	12,040,024
1994	24,002,163	2,429,626	7,744,171	13,828,366
1995	30,903,339	2,409,627	10,757,953	17,735,759
1996	40,918,944	3,486,230	14,673,680	22,759,034
1997	50,882,613	4,126,439	18,025,311	28,730,863
1998	61,656,226	5,710,490	21,148,527	34,797,209
1999	71,966,224	5,437,957	25,122,142	41,406,125
2000	86,164,531	6,190,496	29,589,949	50,384,086
2001	87,996,919	6,121,897	28,124,337	53,750,685
2002	95,422,384	6,182,602	30,231,115	59,008,667
2003	135,417,000	5,436,000	44,917,000	85,064,000
2004	155,113,000	6,183,000	53,699,000	95,231,000
2005	171,878,000	6,232,000	61,126,000	104,520,000
2006	193,076,000	6,951,000	70,350,000	115,775,000
2007	208,803,000	7,488,000	75,443,000	125,872,000
2008	225,362,000	8,314,000	82,369,000	134,679,000
2009	223,033,000	7,726,000	81,703,000	133,604,000
2010	244,786,000	9,668,000	89,673,000	145,445,000
2011	271,024,000	9,254,000	102,241,000	159,529,000
2012	297,156,000	10,010,000	116,384,000	170,762,000
2013	307,897,000	11,505,000	117,202,000	179,190,000
2014	326,645,000	13,200,000	126,190,000	187,255,000
2015	364,982,000	15,462,000	142,964,000	206,556,000

Para la distribución espacial del PIB se realizó un análisis geoestadístico y como método de interpolación se utilizó Kriging a partir de la siguiente ecuación.

$$PIB = PIB_{primario} + PIB_{secundario} + PIB_{terciario}$$

Ecuación 5. Distribución económica anual del PIB.

El último paso consistió en relacionar la distribución espacial del PIB con el tipo de uso de suelo que se tiene en el valle de San Luis Potosí, mediante la siguiente ecuación.

$$PIB = (PIB * A_{US})$$

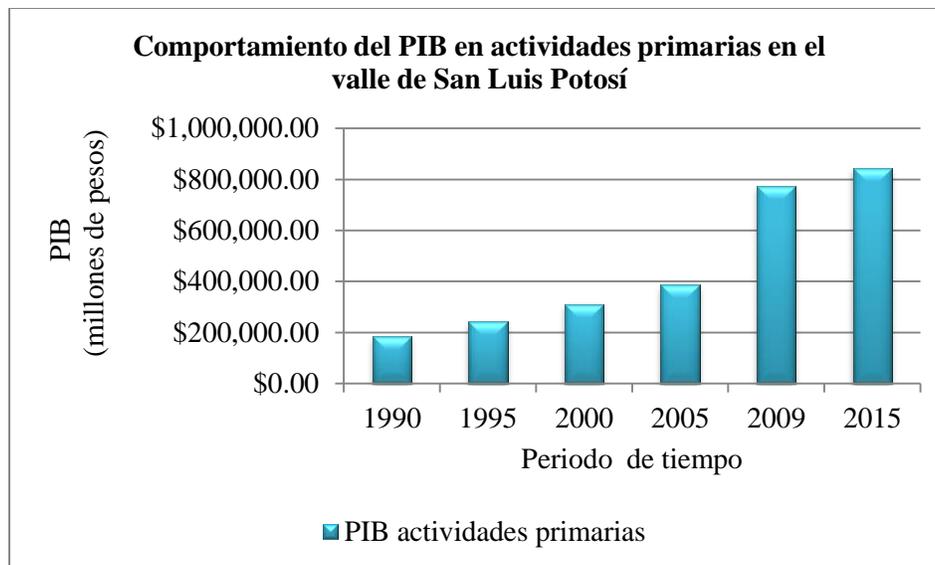
Ecuación 6. Distribución espacial del PIB.

### **3.5.1. Análisis de la distribución del PIB en los diferentes periodos de estudio**

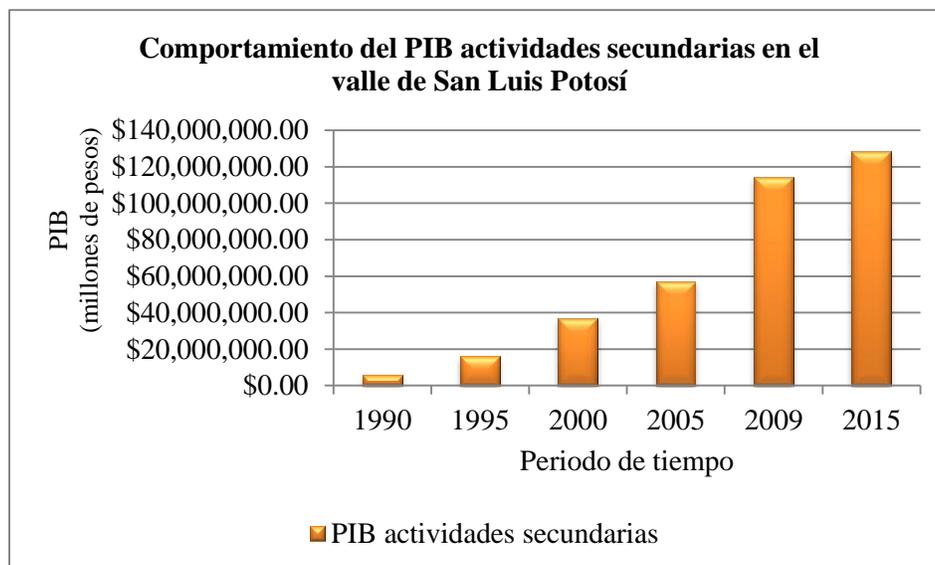
El análisis de la distribución del PIB manifiesta que la zona noreste y una pequeña parte de la zona sur del área de estudio indican presencia de actividades primarias. En la zona centro del valle se localizan las actividades secundarias y terciarias. Siendo estas últimas las que registran el PIB más alto de toda la región para el año de 1990.

El año 1995, 2000 y 2005 son muy similares de manera que las actividades primarias son registradas a los costados de la zona urbana y de la Sierra de San Miguelito. Las actividades secundarias y terciarias son ubicadas al centro del área de estudio, además de ser la zona con el PIB más elevado.

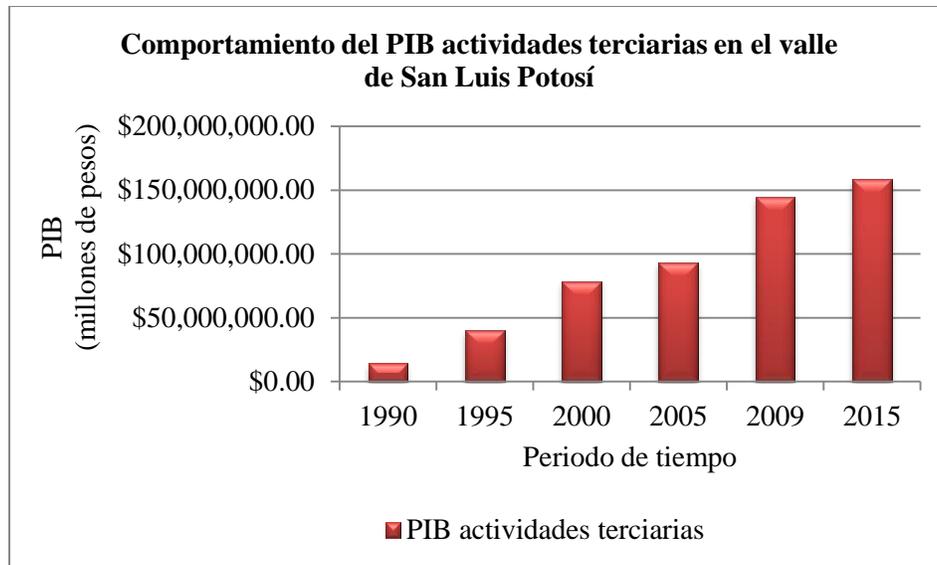
Los años 2009 y 2015 registran un pequeño aumento de actividades secundarias y terciarias en distintos puntos del área de estudio, sin embargo la zona centro es donde se tiene el registro de PIB más elevado. En cuanto a las actividades primarias presentan las mismas tendencias de ubicación en el noreste y el sur del valle de San Luis Potosí. Las Gráficas 11, 12 y 13 muestran el comportamiento del PIB de las tres últimas décadas en el valle de San Luis Potosí a través de las actividades primarias, secundarias y terciarias.



Gráfica 11. Crecimiento de las actividades primarias a través de las últimas tres décadas.



Gráfica 12. Crecimiento de las actividades secundarias a través de las últimas tres décadas.



Gráfica 13. Crecimiento de las actividades terciarias a través de las últimas tres décadas.

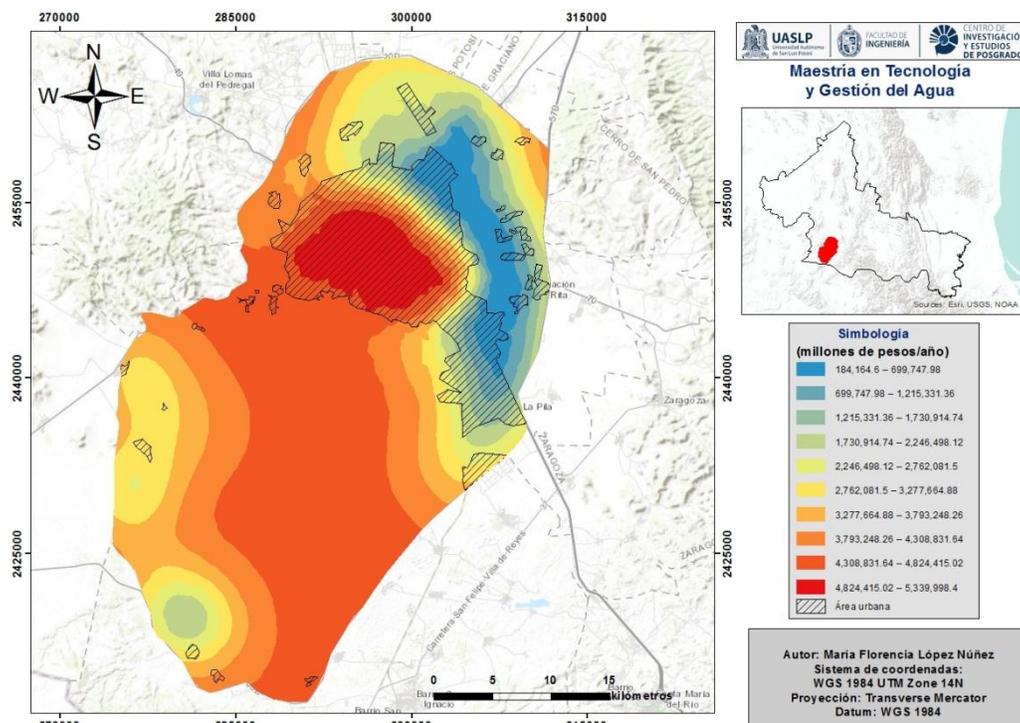


Figura 35. Producto Interno Bruto 1990.

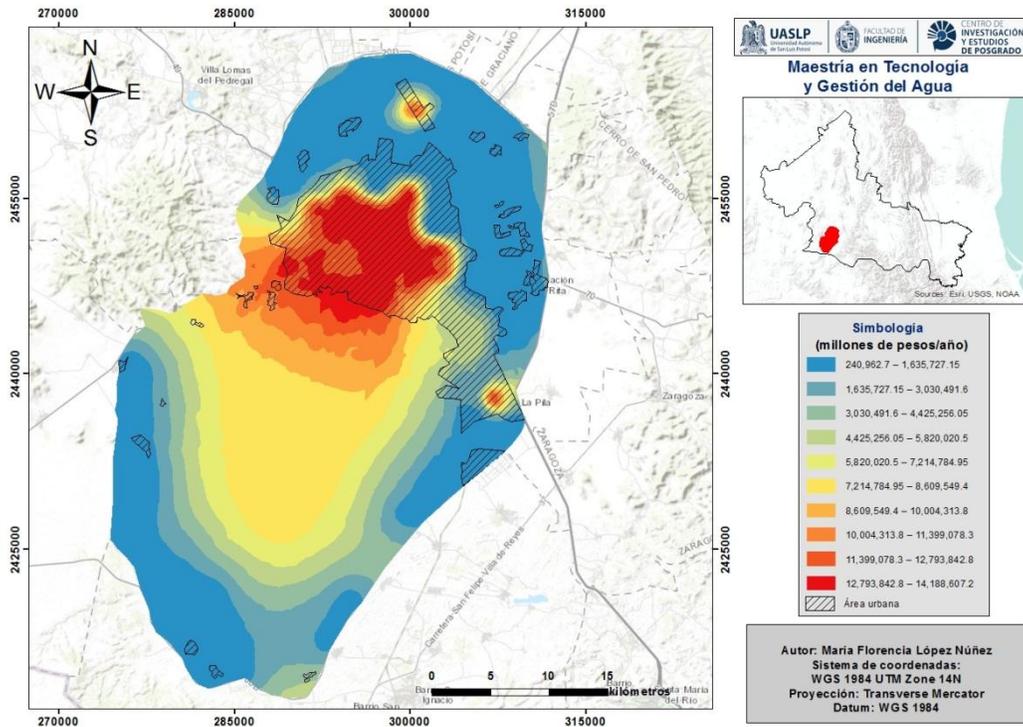


Figura 36. Producto Interno Bruto 1995.

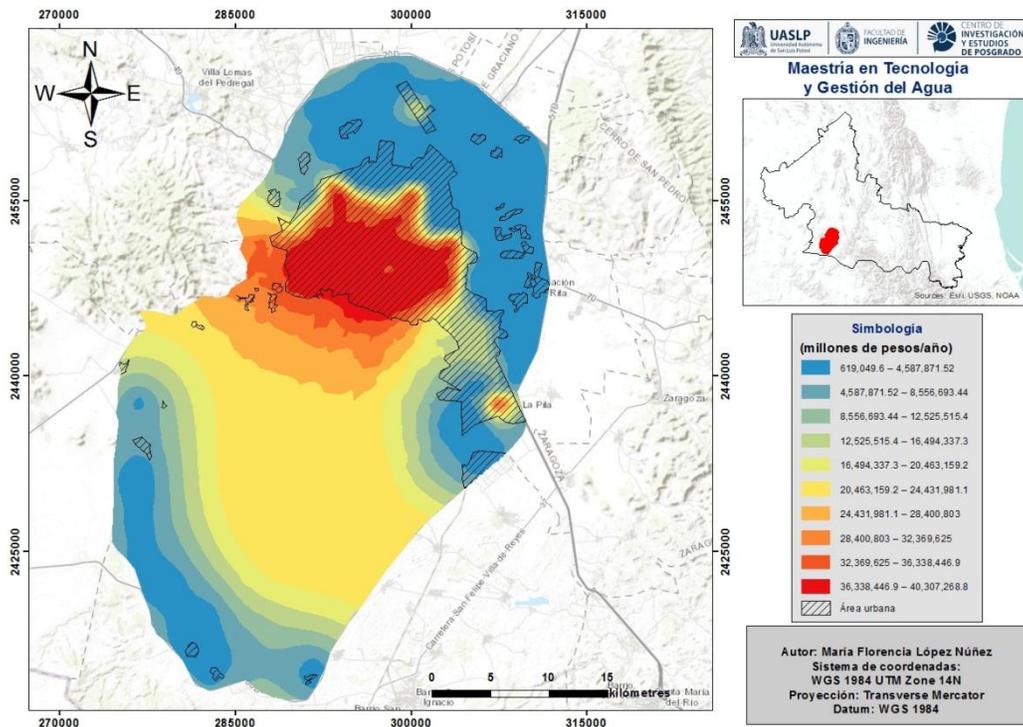


Figura 37. Producto Interno Bruto 2000.

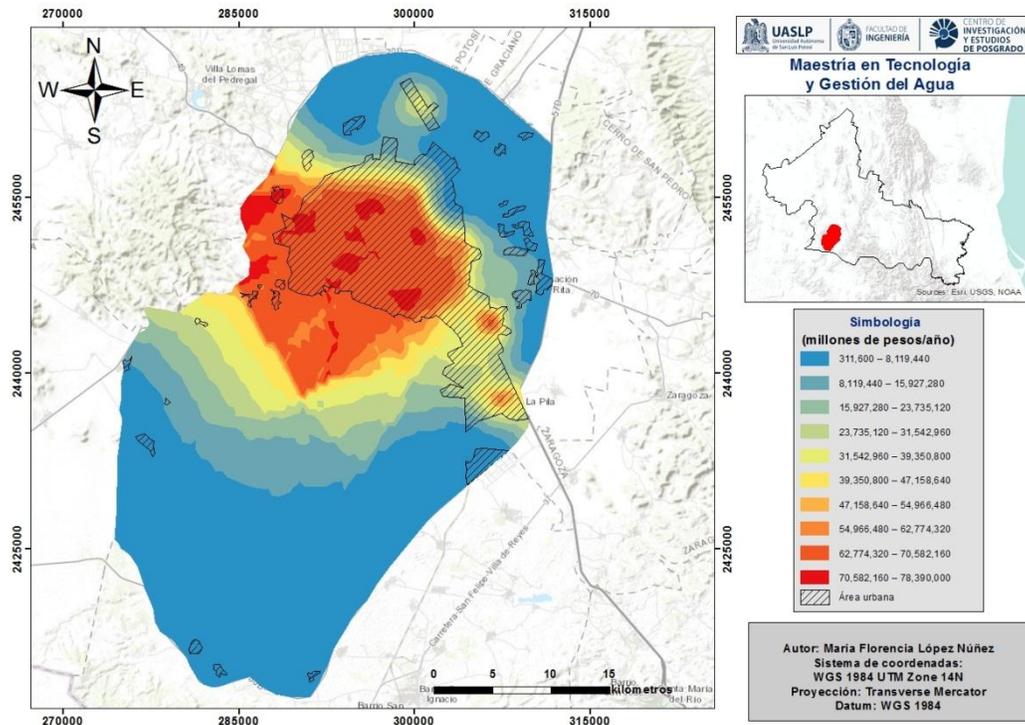


Figura 38. Producto Interno Bruto 2005

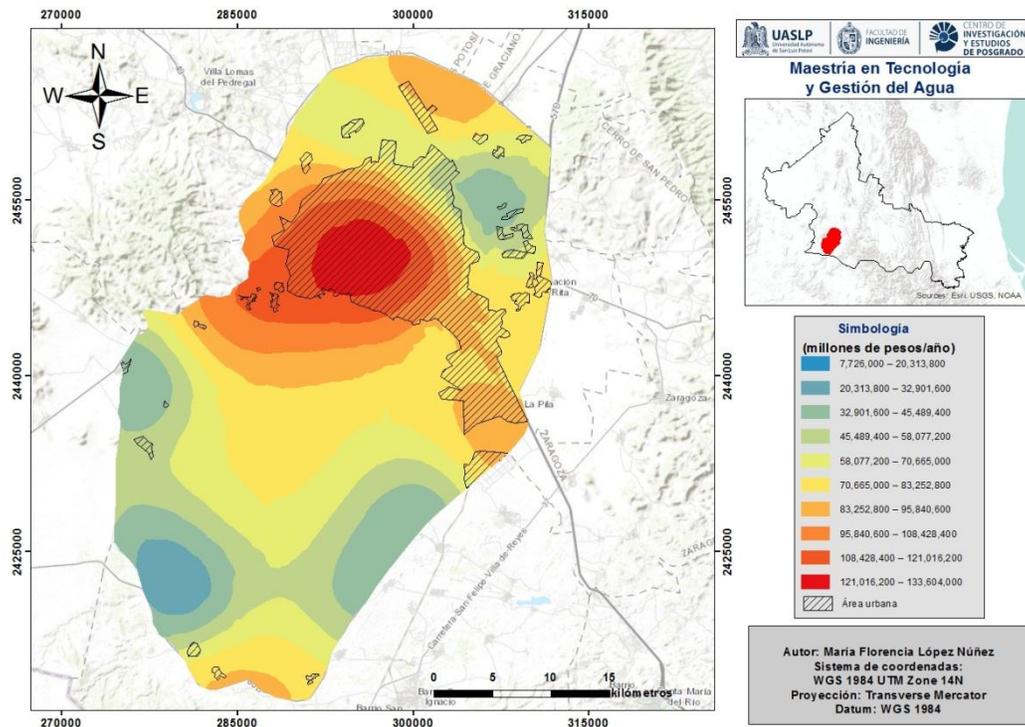


Figura 39. Producto Interno Bruto 2009.

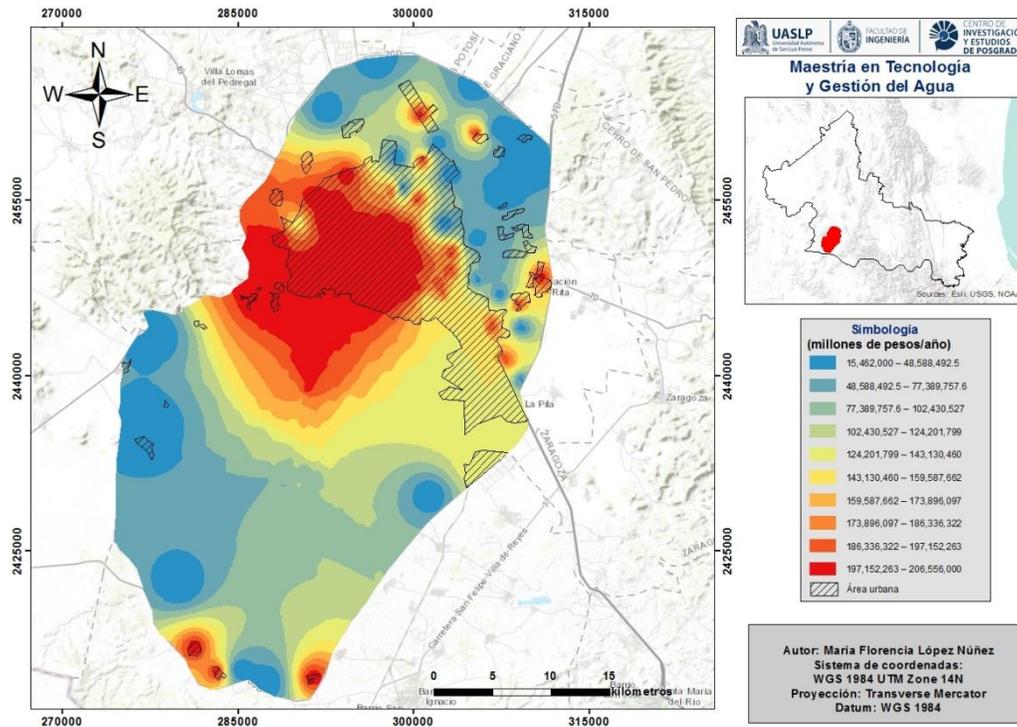


Figura 40. Producto Interno Bruto 2015.

### 3.6. Análisis de distribución espacial de los usos de agua para servicios ambientales

Los servicios ambientales son las actividades, productos y procesos que la naturaleza nos proporciona y que posibilitan que la vida sea como la conocemos (aire puro, agua limpia, suelos fértiles, biodiversidad, etc.). En este trabajo el valor del servicio ambiental (VSA), describe la cantidad de aguas nacionales destinada a los distintos tipos de actividades que demandan su consumo. Su obtención se realiza mediante la siguiente ecuación.

$$VSA = \sum A_{us} * V_a$$

Ecuación 7. Valor de servicio ambiental.

Este indicador se define como la sumatoria del producto entre el área por el tipo de uso de suelo y el volumen de agua destinado al uso de suelo.  $A_{us}$  corresponde al área ocupada en dependencia del tipo de suelo y  $V_a$  es el volumen de agua destinado a las actividades desarrolladas según el uso de suelo.

Los volúmenes de agua fueron obtenidos según el “Estudio Técnico del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí” y otros registros que fueron facilitados por CONAGUA. Los volúmenes históricos utilizados en las actividades humanas se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Volumen de agua destinado a las actividades humanas en el valle de San Luis Potosí.

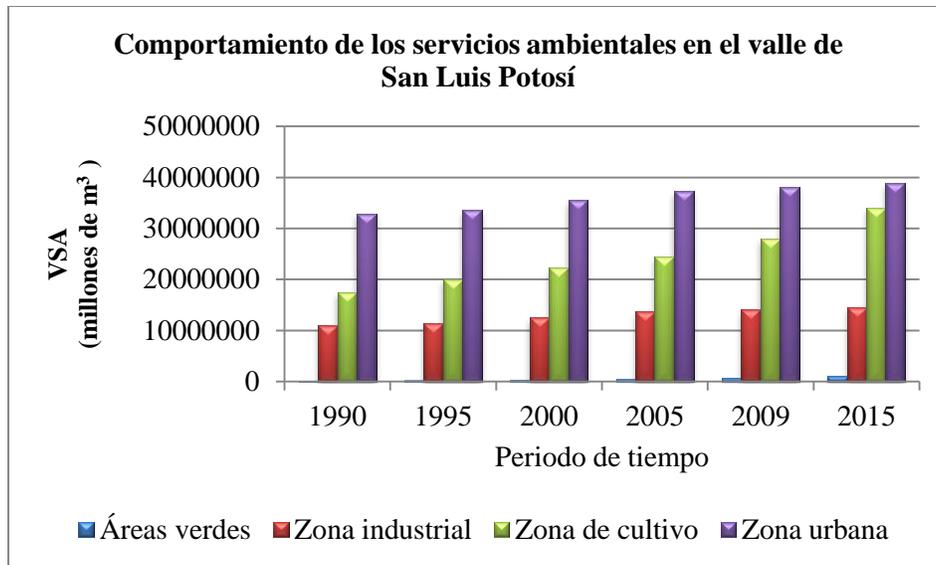
Periodo	Volumen total (Mm <sup>3</sup> )	Zona urbana (Mm <sup>3</sup> )	Zona de cultivo (Mm <sup>3</sup> )	Áreas verdes (Mm <sup>3</sup> )
1990	107	73	17	0.06
1995	110	76	20	0.20
2000	117	83	22	0.33
2005	124	90	24	0.47
2009	131	93	28	0.68
2015	142	96	34	1.04
2017	148	98	36	1.20

Teniendo la cantidad de agua destinada para cada actividad, se procedió a distribuir el volumen de agua en las zonas correspondientes dentro del valle.

### 3.6.1. Análisis de los valores de servicios ambientales en los diferentes periodos de estudio

La variable de VSA para los periodos de análisis de 1990, 1995, 2000, 2005, 2009 y 2015 muestra similitud, y una tendencia positiva respecto al volumen de agua utilizado por los sectores de zona urbana, zona de cultivos y áreas verdes.

El VSA Indica que la zona urbana es el sector al que se destina el mayor volumen de agua, así mismo es posible identificar áreas, en las que el volumen de agua difiere unas de otras. Siendo la zona poniente la que utiliza un mayor volumen de agua, este sector de la ciudad es donde existe una mejor infraestructura de abastecimiento, también cuenta con la mayor parte de centros comerciales, centros educativos, hospitales, etc. Le sigue la zona industrial de la capital potosina, ubicada desde periférico sur hasta los límites con la delegación de La Pila. Es importante recordar que la zona industrial ha tenido un gran crecimiento en los últimos 25 años, sin embargo muchas empresas cuentan con plantas de tratamiento, lo cual disminuye el consumo de agua para sus procesos. Las zonas de cultivo se han ido desplazando hacia el norte del área de estudio o en algunos casos han ido desapareciendo, esto debido al crecimiento de la mancha urbana a través del tiempo. No obstante en algunas otras regiones ha emergido la actividad primaria, concretamente hacia el sur del área de estudio. En cuanto a las áreas verdes estas han tenido una disminución en el centro del área urbana, por otra parte estas áreas se han incrementado en los nuevos fraccionamientos y empresas industriales. En la Gráfica 14 se muestra el comportamiento de los servicios ambientales durante las últimas tres décadas.



Gráfica 14. Valor de Servicios Ambientales (VSA) en las últimas tres décadas.

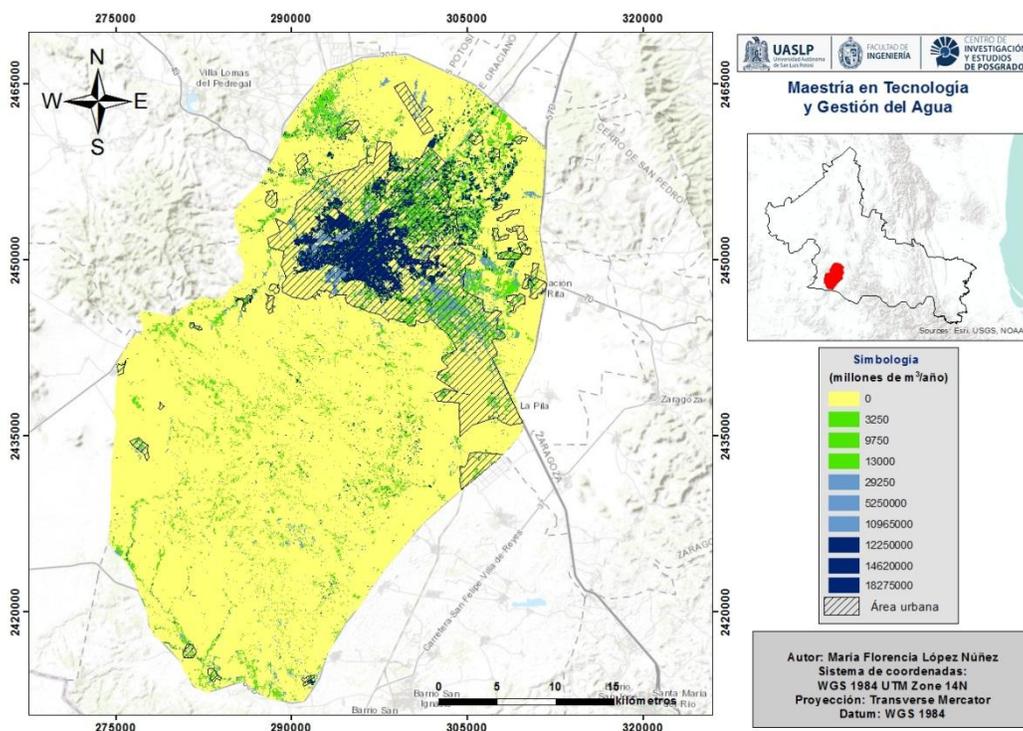


Figura 41. Servicios Ambientales 1990

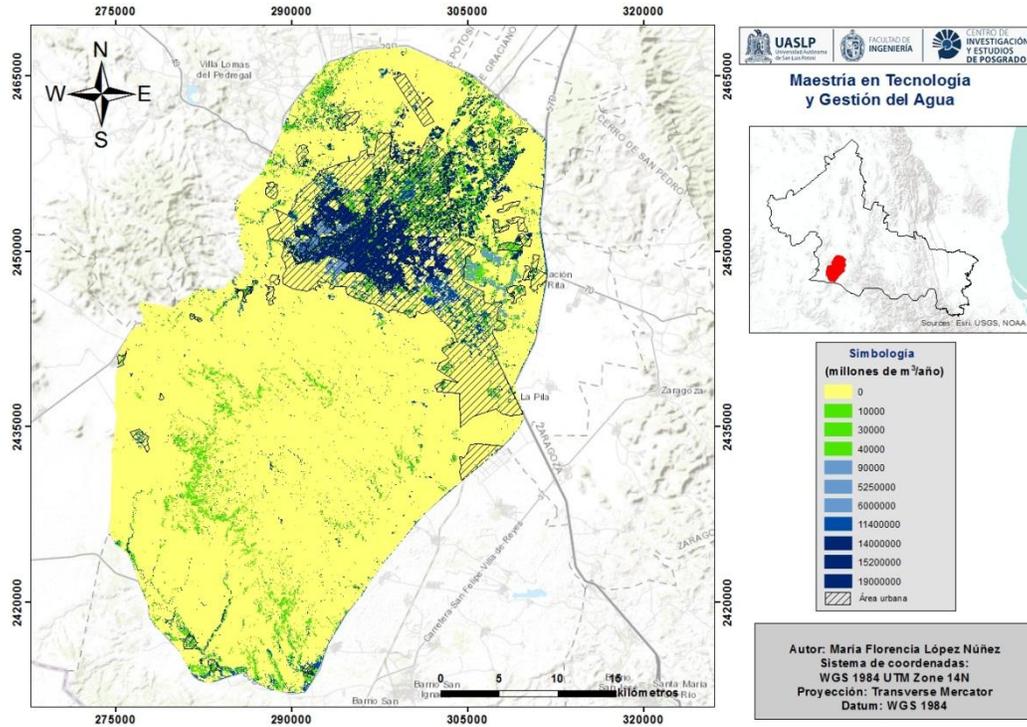


Figura 42. Servicios Ambientales 1995.

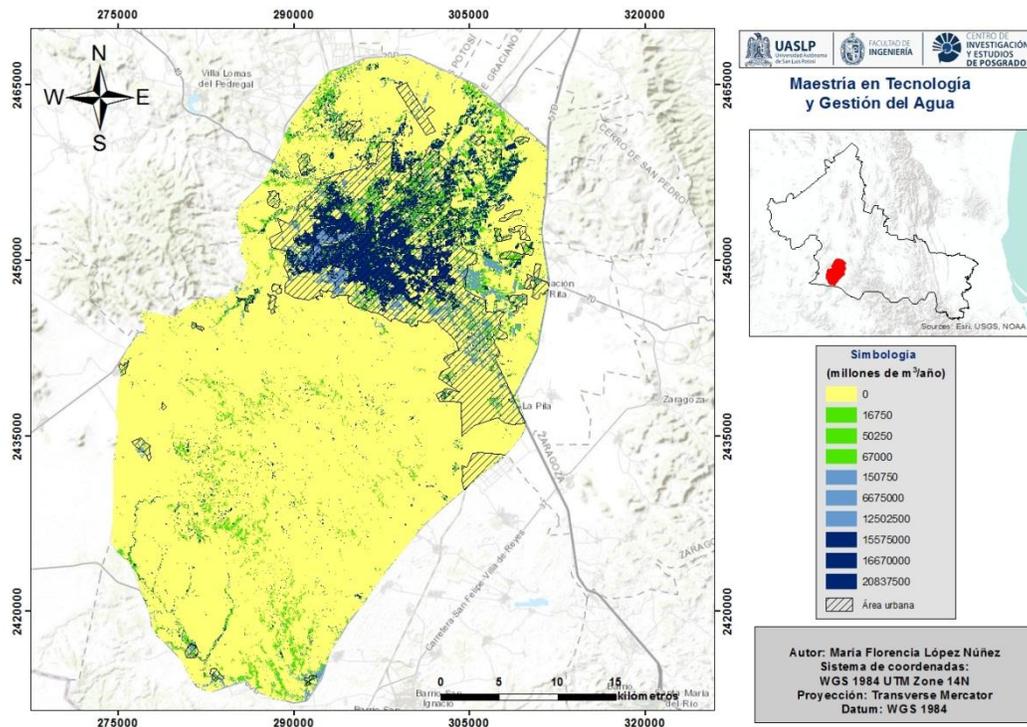


Figura 43. Servicios Ambientales 2000.

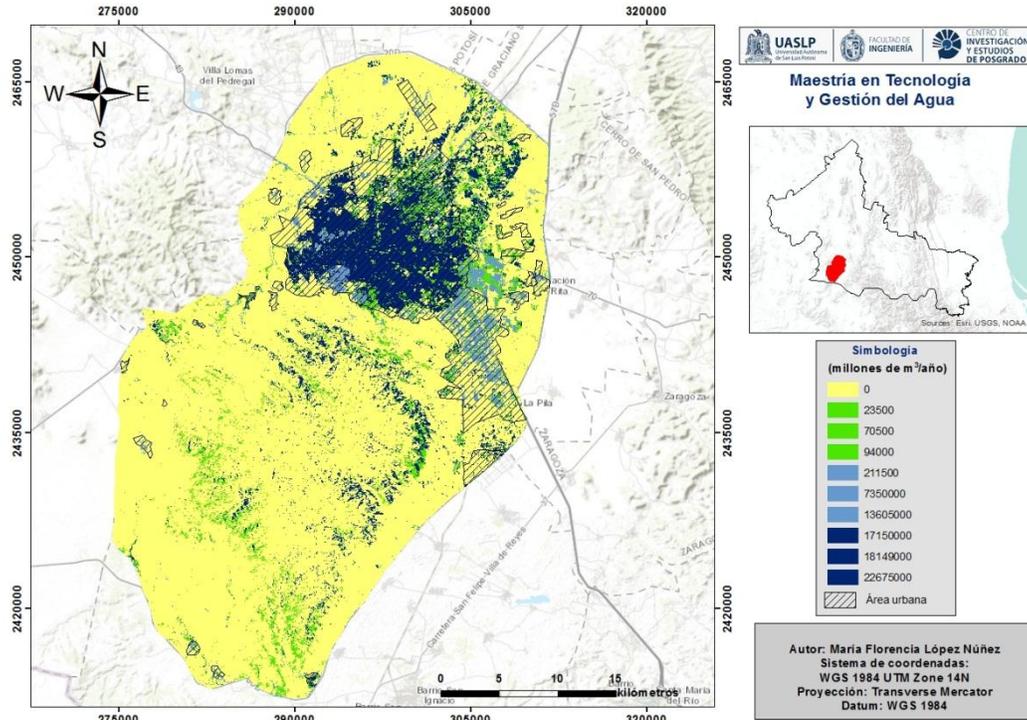


Figura 44. Servicios Ambientales 2005.

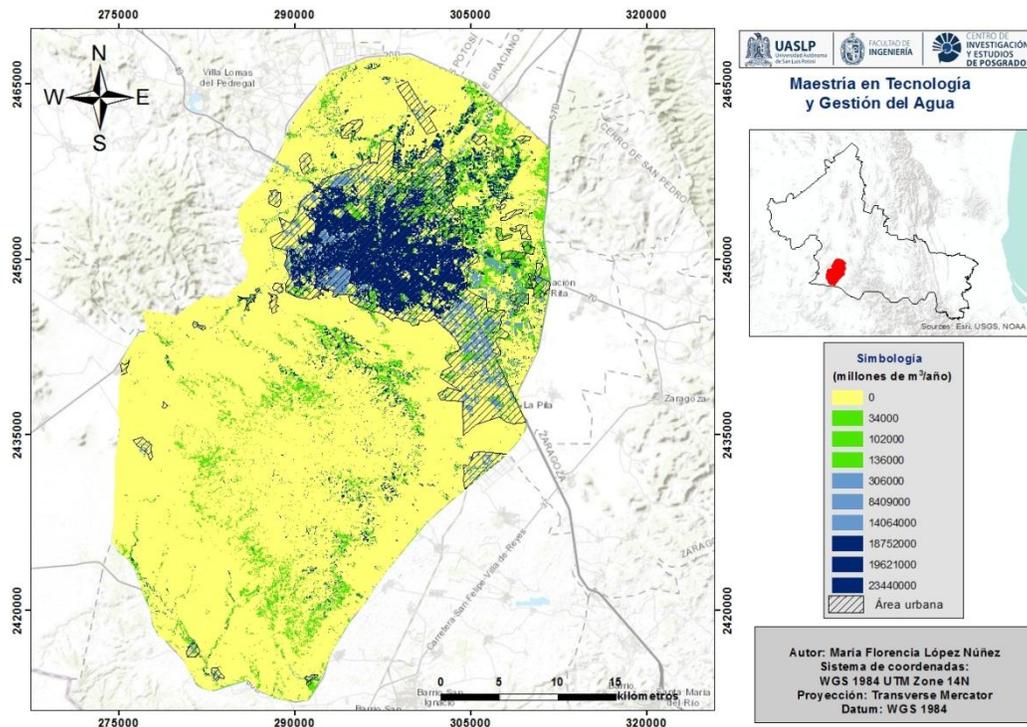


Figura 45. Servicios Ambientales 2009.

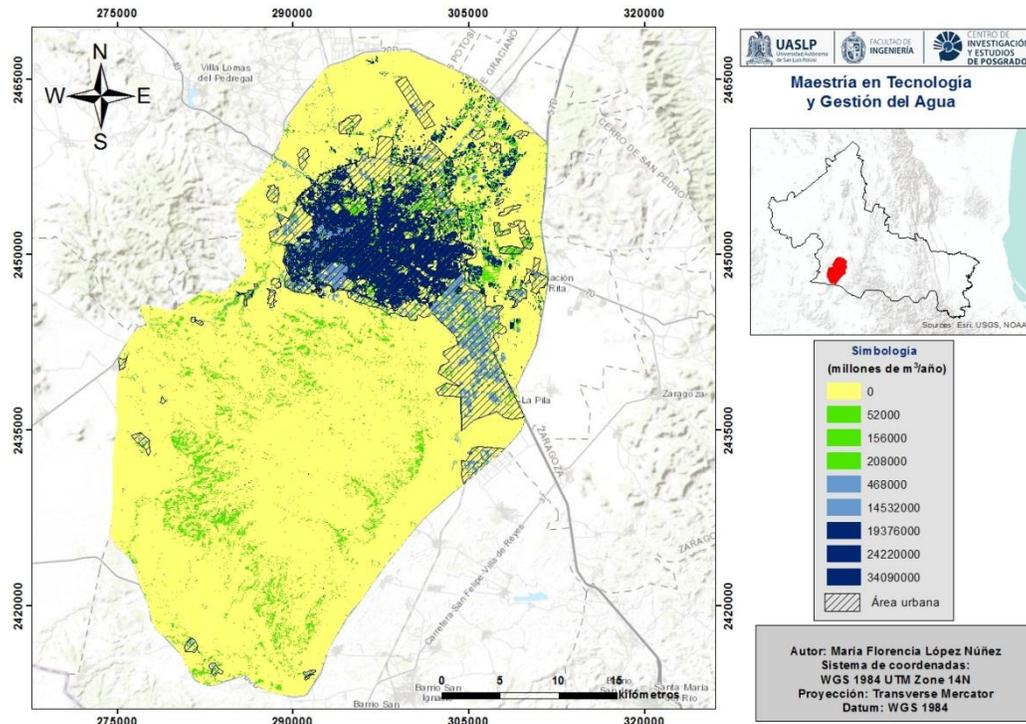


Figura 46. Servicios Ambientales 2015.

### 3.7. Distribución espacial del Uso y Aprovechamiento del Agua (UAA)

El índice del uso y aprovechamiento del agua (UAA) pondera los beneficios que obtiene un sistema ecológico, económico y social por el consumo de agua. Este índice se clasifica dentro de tres categorías; uso y aprovechamiento ecológico, uso y aprovechamiento económico, uso y aprovechamiento social. Según Huang *et al.*, (2014) es una propuesta para el manejo sustentable de los recursos hídricos y por consiguiente para asegurar un sano desarrollo en la sociedad. Se ha empleado como una herramienta en la toma de decisiones de instituciones gubernamentales, privadas y sociales encargadas del manejo y preservación del agua.

Con la obtención de las variables (ETR, PIB, VSA), estas fueron integradas al modelo de distribución del uso y aprovechamiento del agua ecológico ( $UAA_{ecológico}$ ) y económico ( $UAA_{económico}$ ).

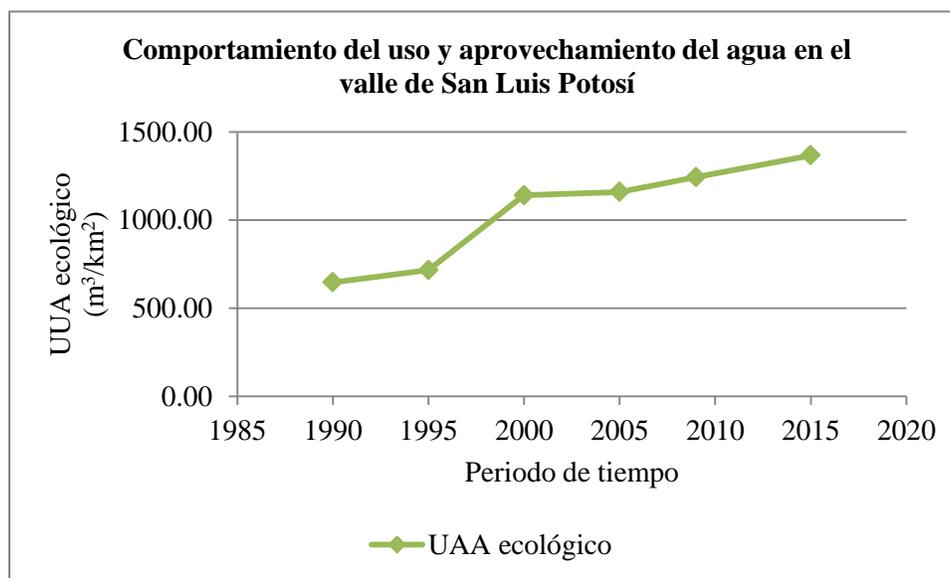
### 3.7.1. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico ( $UAA_{ecológico}$ )

Es un indicador de la relación existente de los diferentes usos de suelo en el valle de San Luis Potosí, y del volumen de agua destinada por el uso de suelo (urbano, agrícola, forestal, etc.). Obteniendo un parámetro que muestra si la demanda, y la extracción de agua en el valle de San Luis Potosí corresponde al consumo total del agua asociado a la evapotranspiración.

$$UAA_{ecológico} = \frac{VSA}{ETR}$$

Ecuación 8. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico.

Donde  $UAA_{ecológico}$  es la distribución espacial del Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico en el valle de San Luis Potosí,  $VSA$  corresponde a la distribución espacial de los servicios ambientales y  $ETR$  es la distribución espacial de la evapotranspiración real anual. Los valores más altos del indicador se ubican en la zona urbana, concretamente el sector poniente de la mancha urbana. Los valores correspondientes a la zona agrícola, son ubicados principalmente en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez. De manera que se observó que a lo largo del análisis multitemporal el  $UAA_{ecológico}$  sigue el mismo comportamiento espacial. Además de que el valor del indicador tiene un aumento año tras año, derivado del crecimiento poblacional y de la demanda del recurso. La Gráfica 16 muestra el comportamiento del uso y aprovechamiento del agua económico en las últimas tres décadas.



Gráfica 15. Uso y Aprovechamiento del agua Ecológico en las últimas tres décadas.

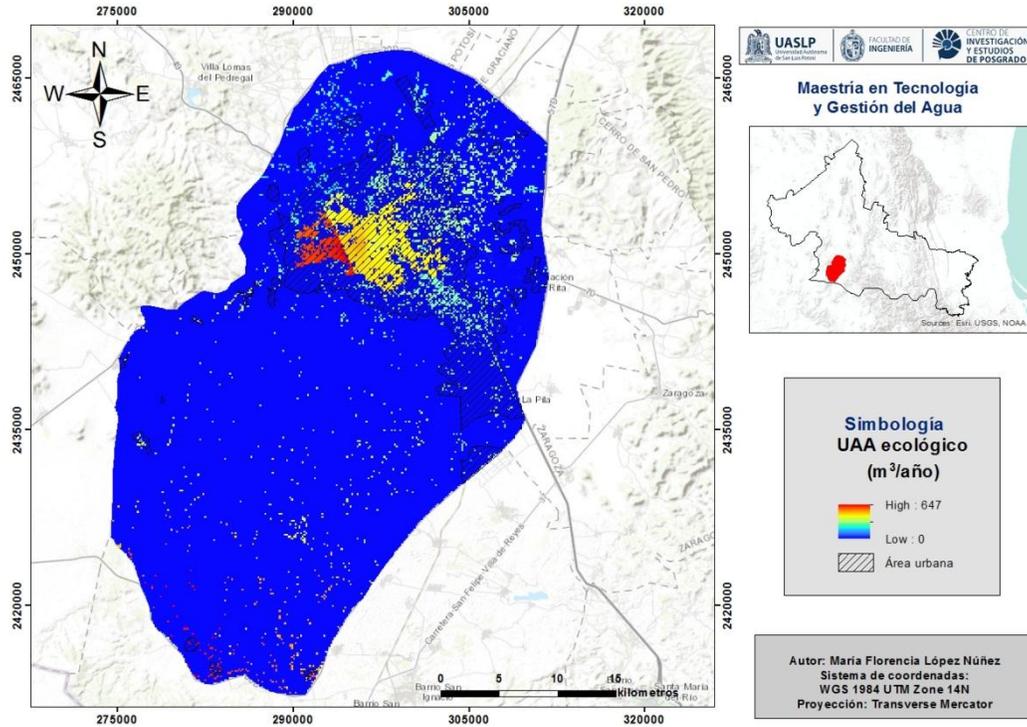


Figura 47. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 1990.

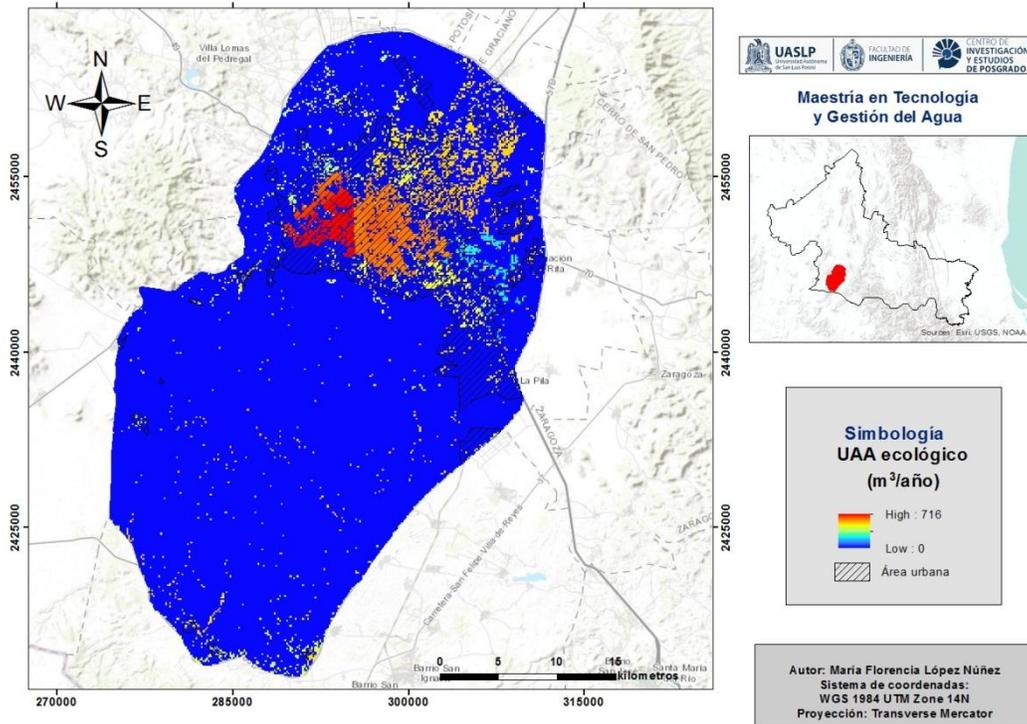


Figura 48. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 1995.

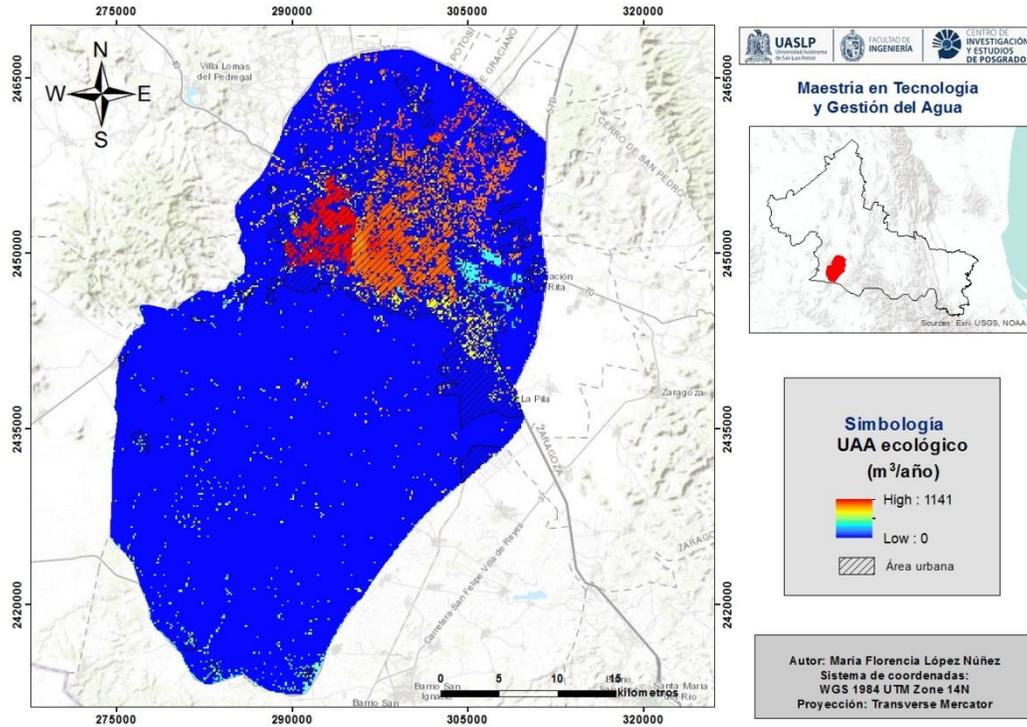


Figura 49. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2000.

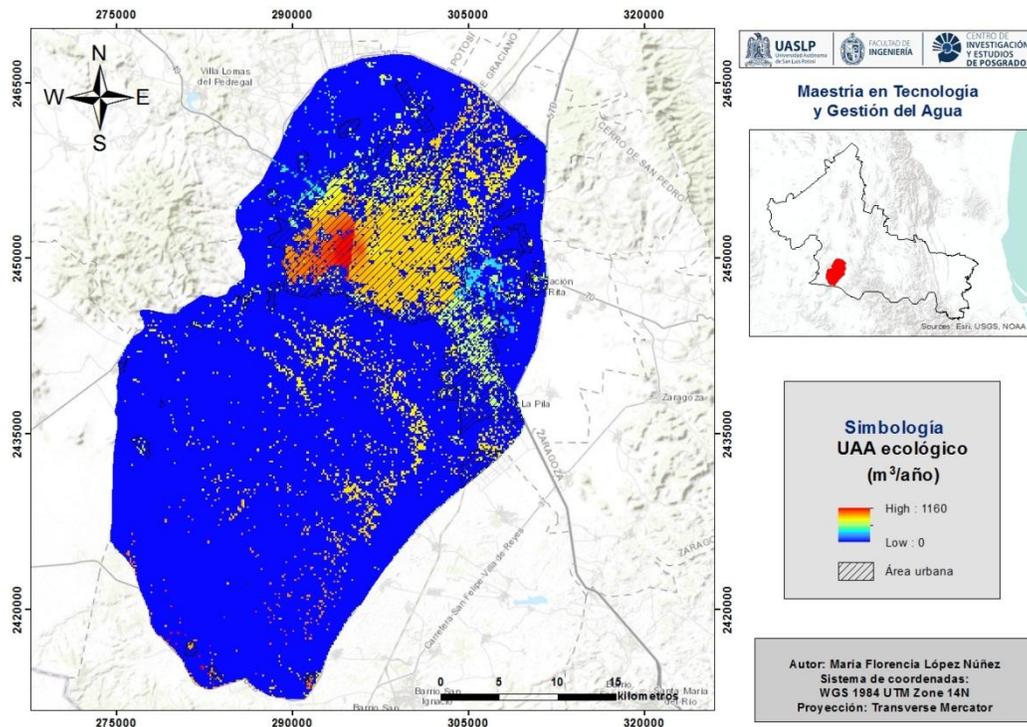


Figura 50. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2005.

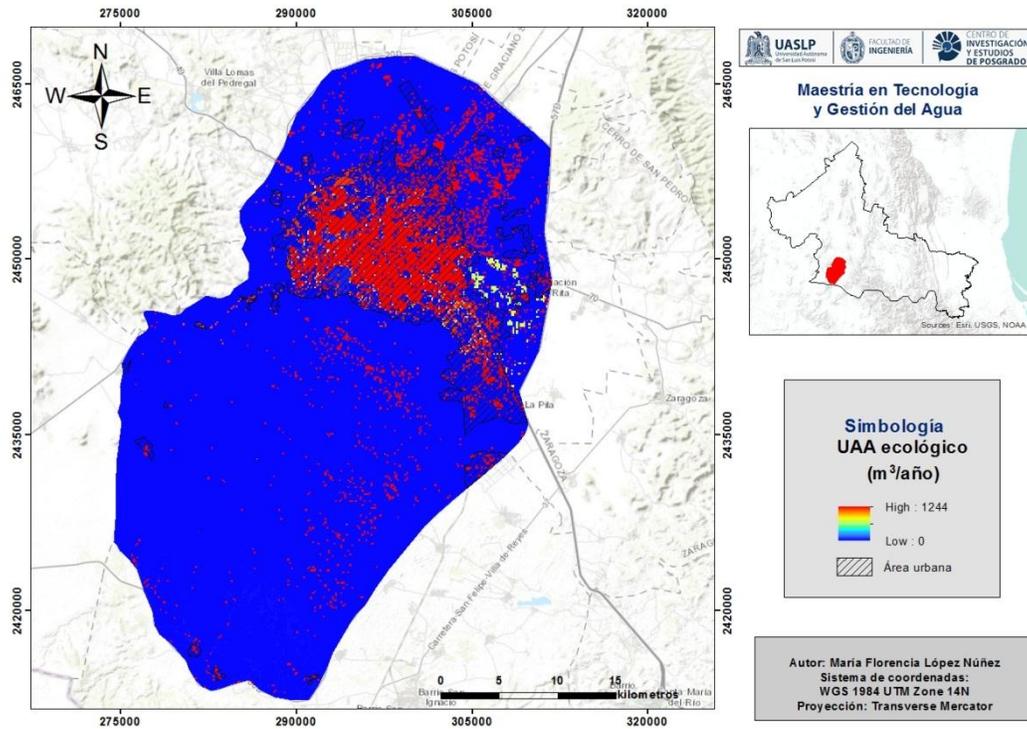


Figura 51. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2009.

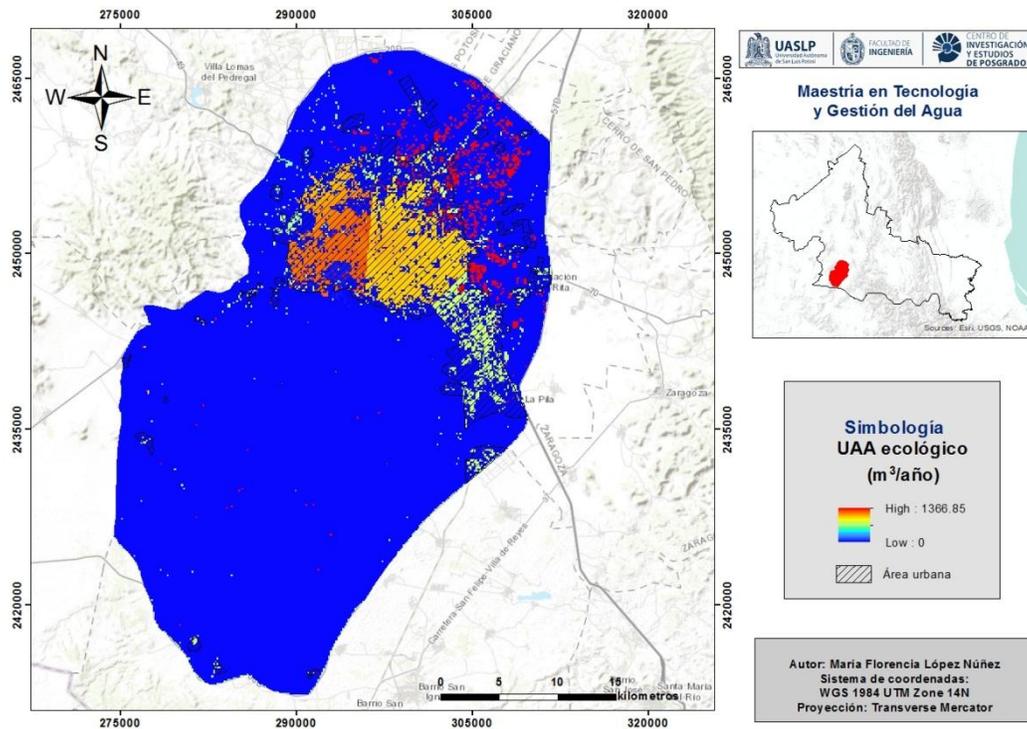


Figura 52. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2015.

### 3.7.2. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico ( $UAA_{económico}$ )

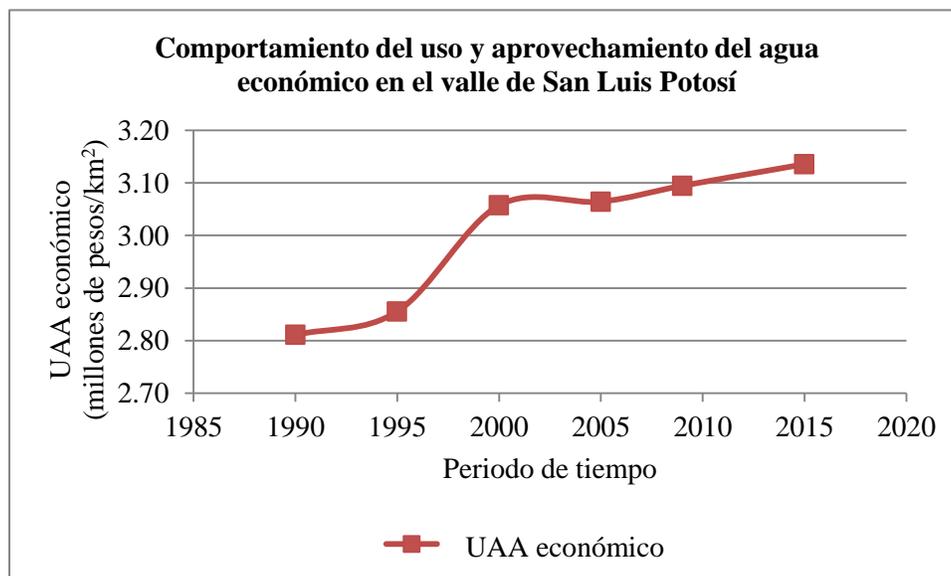
Es un índice basado en el censo económico anual del Estado de San Luis Potosí, derivado de los datos del PIB. El indicador muestra el comportamiento del manejo hídrico en un sector económico. Se obtiene de la siguiente manera:

$$UAA_{económico} = \frac{PIB}{ETR}$$

Ecuación 9. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico.

Donde  $UAA_{económico}$  es la distribución espacial del Uso y Aprovechamiento del Agua Económico en el valle de San Luis Potosí,  $PIB$  corresponde a la distribución espacial de la economía anual y  $ETR$  es la distribución espacial de la evapotranspiración real anual.

La zona urbana es donde se encuentran los valores más altos del indicador a lo largo del tiempo, debido a que en esta área es donde se concentra el desarrollo de actividades secundarias y terciarias que son las del mayor aporte monetario a la región. Las actividades primarias se mantienen con niveles bajos, derivado en primer lugar porque son las de un menor aporte al PIB y en segundo a que han sido desplazadas por asentamientos urbanos. La Gráfica 16 muestra el comportamiento del uso y aprovechamiento del agua económico en las últimas tres décadas.



Gráfica 16. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico en las últimas tres décadas.

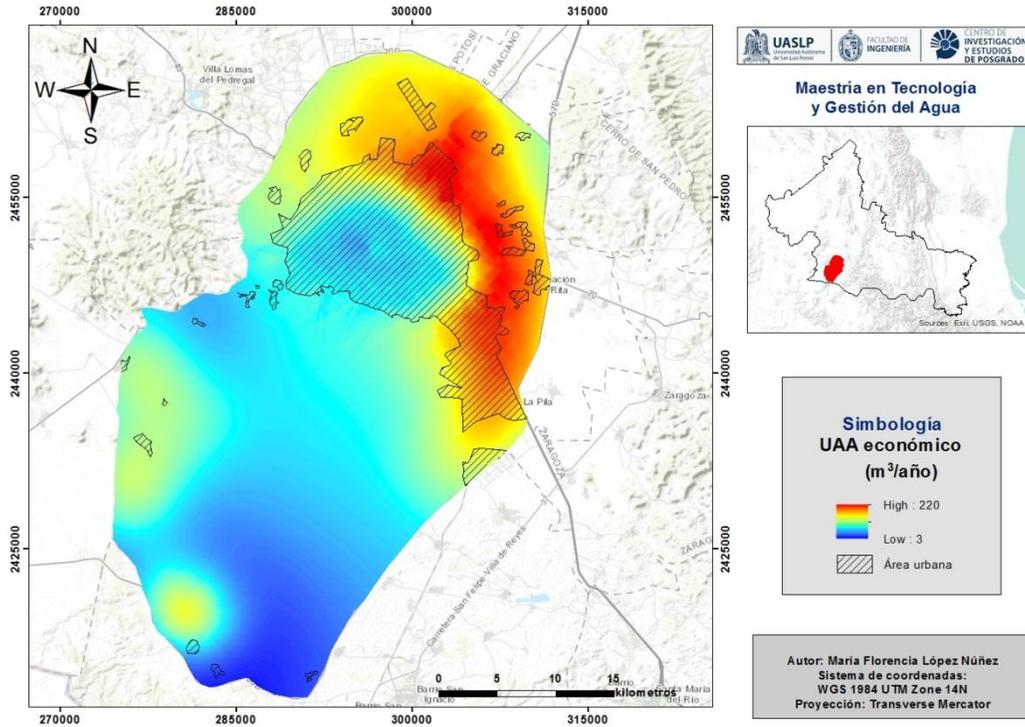


Figura 53. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 1990.

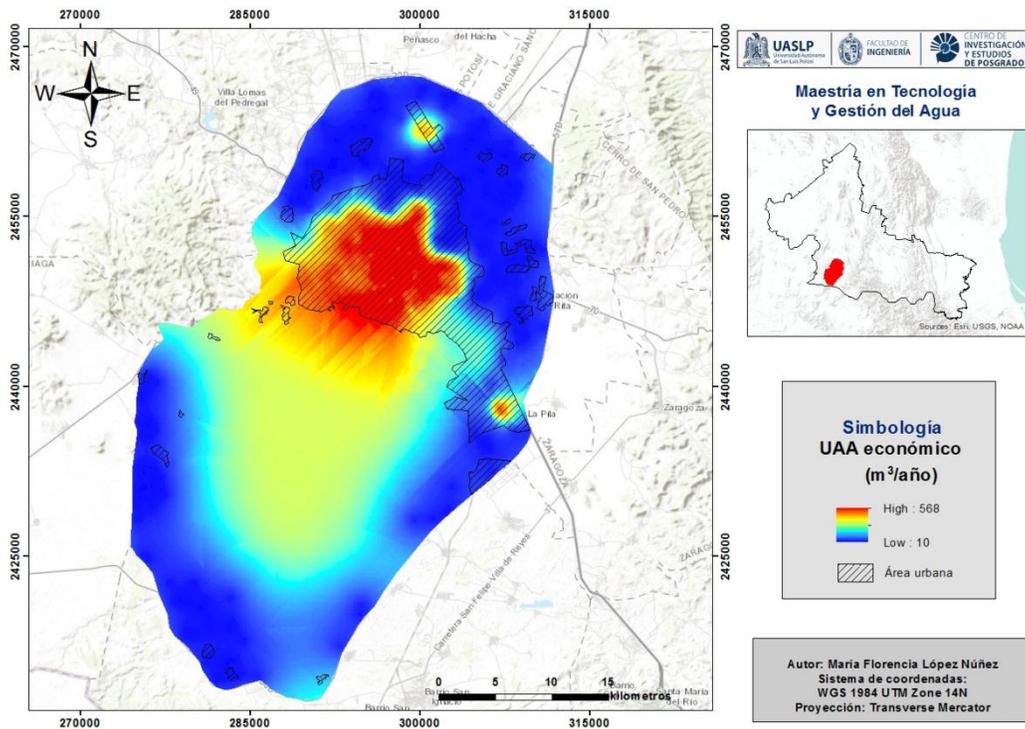


Figura 54. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 1995.

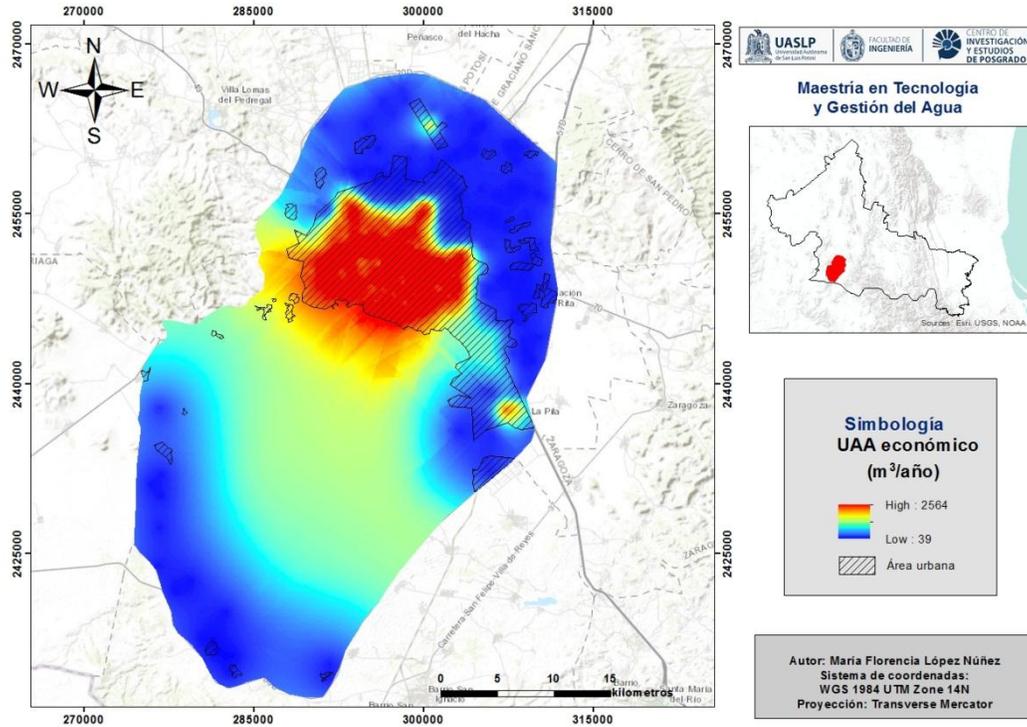


Figura 55. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2000.

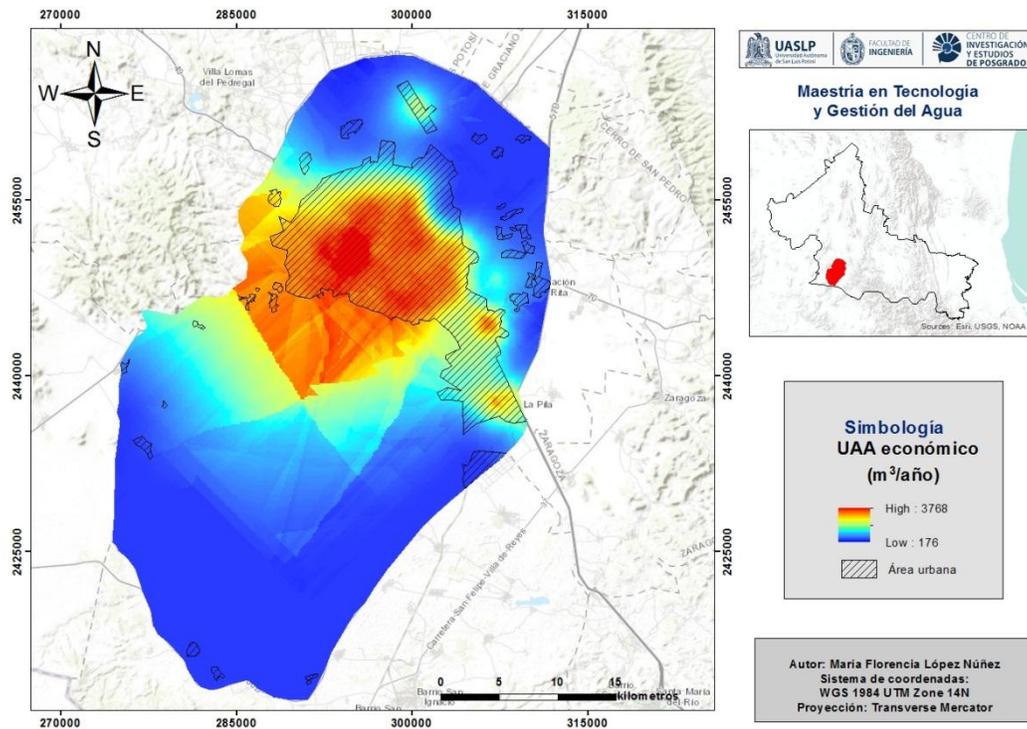


Figura 56. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2005.

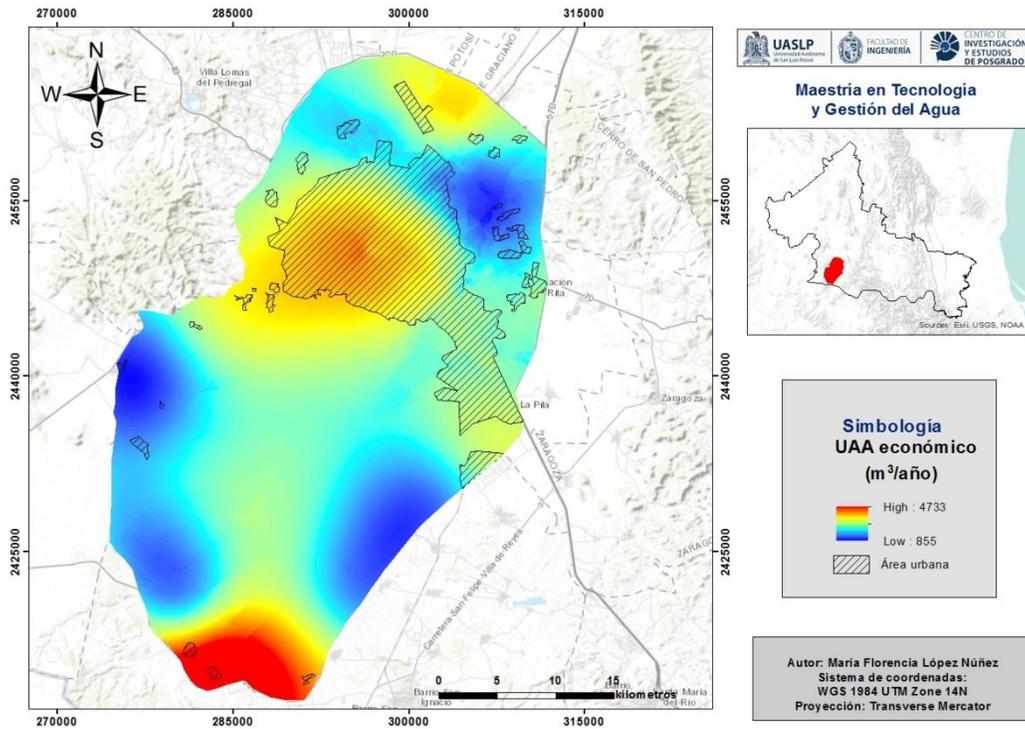


Figura 57. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2009.

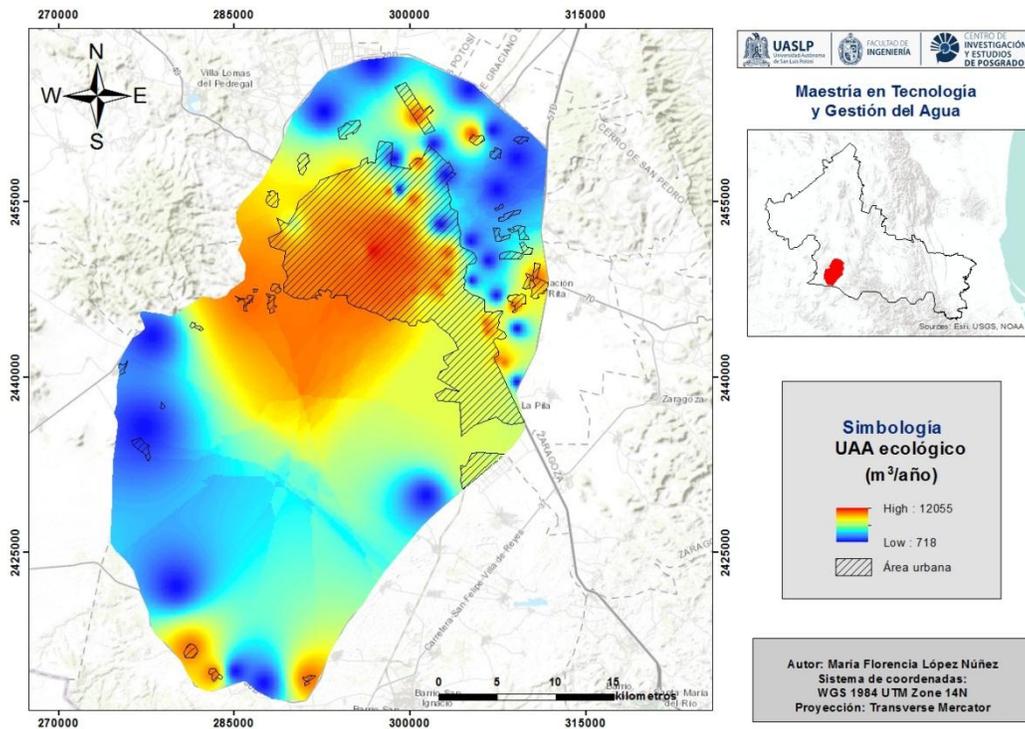


Figura 58. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2015.

### 3.8. Modelo de distribución espacial para uso y aprovechamiento del agua

En estadística se llama una serie de tiempo a un conjunto de observaciones registradas durante periodos temporales, secuencialmente ordenada, tales periodos pueden ser semanales, mensuales, trimestrales o anuales (Hurtado, 2016). Las series de tiempo son un área importante de la predicción, donde se tienen observaciones de una variable y a partir de su análisis se desarrolla un modelo que describa la relación básica (Nava, 2015). Los objetivos de las series temporales son:

- Determinar si se presentan ciertos patrones o pautas no aleatorias.
- Aislar y estudiar sus componentes a fin de proporcionar claves para movimientos futuros.
- Pronosticar los movimientos futuros así como otros aspectos que estén sincronizados.

Actualmente se cuenta con un conjunto de herramientas de cálculo y procesamiento de datos mediante los cuales se pueden hacer proyecciones (Coutin, 2007). El análisis de series de tiempo se ha llevado a cabo a través de diversas metodologías como; suavizamiento exponencial, descomposición, promedios móviles, etc. El modelo de ARIMA denominado así por sus siglas en inglés Autoregressive Integrated Moving Average, es una de las técnicas más empleadas en los modelos de series de tiempo.

El modelo ARIMA popularizado en los años setentas por George Box y Gwilym Jenkins, proporciona la ventaja de realizar predicciones óptimas en el plazo inmediato y en el corto plazo. Esto es debido a que la metodología de Box-Jenkins permite elegir entre un amplio rango de distintos modelos según represente mejor el comportamiento de los datos. La ecuación básica del modelo ARIMA es la siguiente:

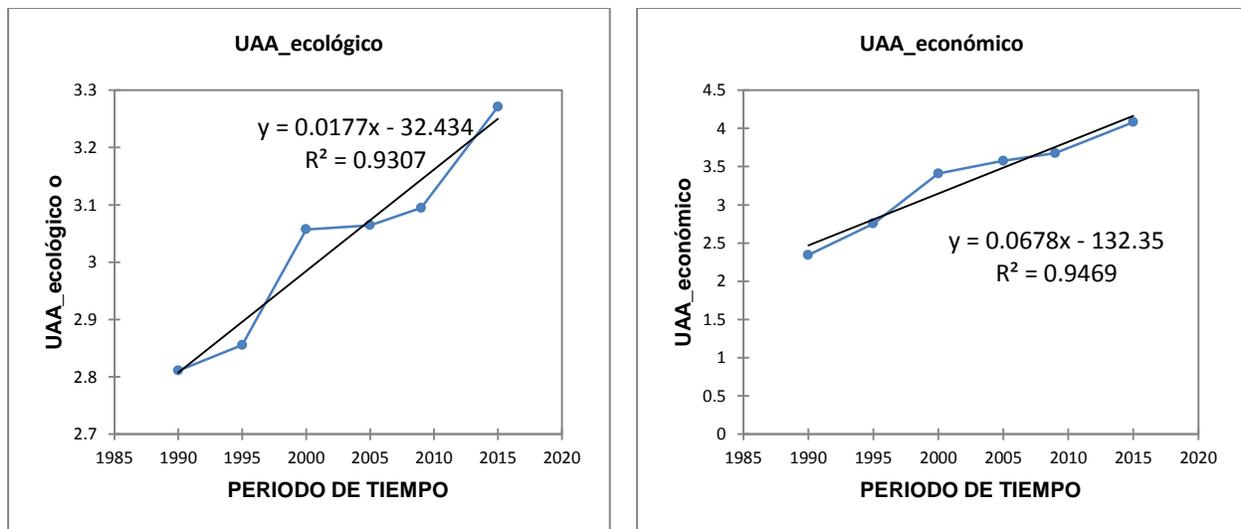
$$Y_t = \theta_0 + \theta_1 y_{t-1} + \theta_2 y_{t-2} + \dots + \theta_p y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_p \varepsilon_{t-p}$$

Ecuación 10. Ecuación general de la metodología ARIMA

Donde  $y_t$  y  $\varepsilon_t$  son el error actual y aleatorio del error en el tiempo;  $\theta_i$  y  $\phi_i$  son parámetros del modelo conocidos comúnmente como “p y q”, estos son valores enteros y están referidos al orden del modelo.

En este trabajo se utilizó la metodología de ARIMA con el objetivo de predecir el  $UAA_{ecológico}$  y el  $UAA_{económico}$  para el año 2050. Se utilizó la herramienta de XLSAT 2018 que se incorpora en Microsoft Excel, con la cual se logró generar el análisis de la series de tiempo.

Los datos fueron ingresados al archivo de XLSAT, en donde se les aplicó una transformación logarítmica a los valores de  $UAA_{ecológico}$  con el objetivo de que los datos se ajusten mejor al modelo y posteriormente se realizó un análisis del comportamiento de los datos (estacionariedad, correlación, media, varianza, etc.).



Gráfica 17. Comportamiento de las series de tiempo de  $UAA_{ecológica}$  y  $UAA_{económica}$ .

El  $R^2$  para ambos indicadores es cercano a 1 por lo cual, se infiere que el ajuste del modelo es bueno y existe una alta correlación entre las variables del modelo que está representada mediante la línea gris.

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Mediana	Desv. típica
<b>UAA ecológico logaritmo</b>	6	0	6	2.81	3.271	3.0	0.169
				1		26	

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo	Mediana	Desv. típica
<b>UAA económico logaritmo</b>	6	0	6	2.34	4.08	3.3	0.641
				3	1	06	

Posteriormente se manejaron diferentes modelos para las variables de p, d y q con el fin de identificar el modelo que se ajustara mejor a los datos. Se utilizó el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) como el indicador de la exactitud del modelo para la construcción ajustada de valores en la serie de tiempo. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

### 3.8.1. Resultados de la serie de $UAA_{ecológico}$ a través de la metodología de ARIMA

Datos del modelo

XLSTAT 2018.4.51719 - ARIMA - Comienzo: 18/06/2018 a las 05:44:56 p.m. / Final: 18/06/2018 a las 05:44:57 p.m.

Series temporales: Libro = Libro1 / Hoja = Hoja1 / Rango = Hoja1!\$D\$2:\$D\$8 / 6 filas y 1 columna

Datos de fecha: Libro = Libro1 / Hoja = Hoja1 / Rango = 'Hoja1'!\$B\$2:\$B\$8 / 6 filas y 1 columna

Intervalos de confianza (%): 95

Centrar: Sí

Parámetros del modelo:  $p = 1 / d = 1 / q = 1 / P = 0 / D = 0 / Q = 0 / s = 0$

Optimizar: Verosimilitud (Convergencia = 0.00001 / Iteraciones = 500)

Predicción: 7

Intervalos de confianza (%): 95

Semilla (números aleatorios): 688967687

- Resultados tras la optimización

Estadísticos de bondad del ajuste:

Observaciones	5
GL	2
SEC	0.00977938
MEC	0.00195588
RMSE	0.04422529
Varianza RB	0.00195588
MAPE(Dif)	88.5215596
MAPE	1.00770654
-2Log(Vero.)	-14.672249
FPE	0.00293381
	-
AIC	8.67224895
AICC	15.327751
	-
SBC	9.84393522
Iteraciones	66

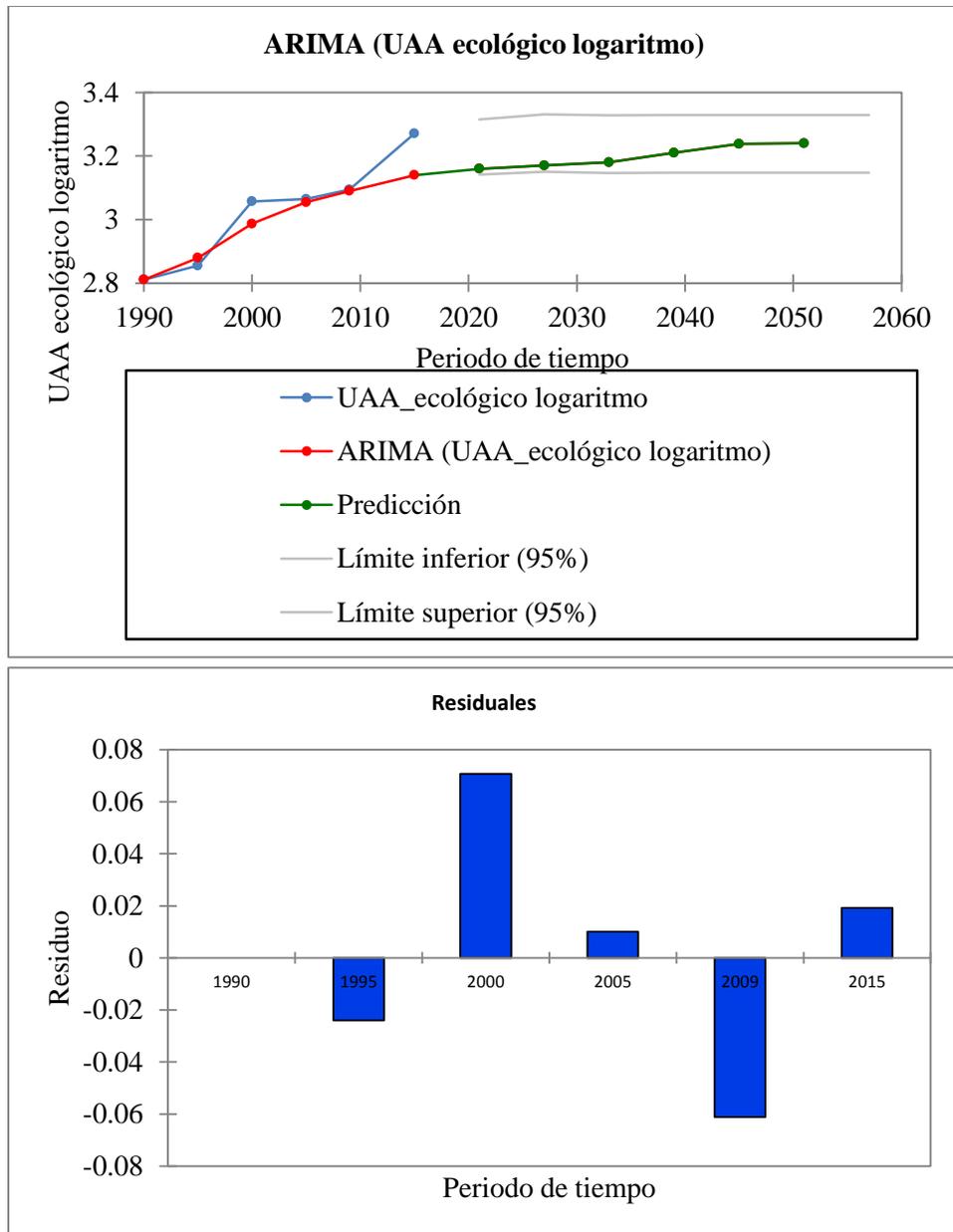
• Parámetros del modelo:

Parámetro	Valor	Error típico Hess.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
Constante	0.085	0.009	0.067	0.103

Parámetro	Valor	Error típico Hess.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Error típico asint.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
AR(1)	-0.296	0.413	-1.106	0.513	0.427	-1.133	0.541
MA(1)	-1.000	0.578	-2.133	0.133	0.000	-1.000	-1.000

• Predicciones y residuos

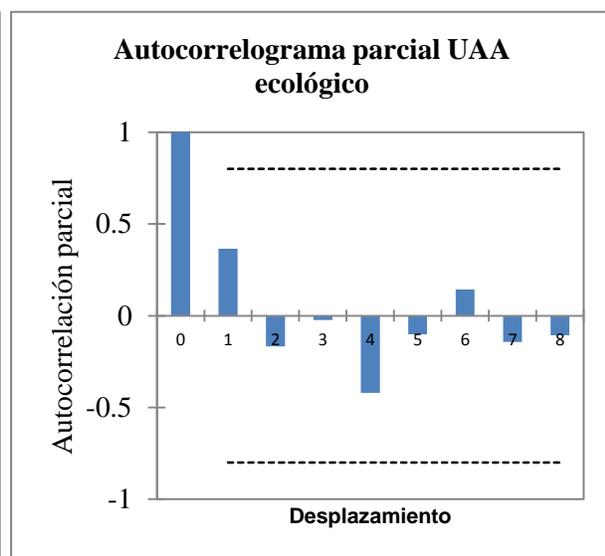
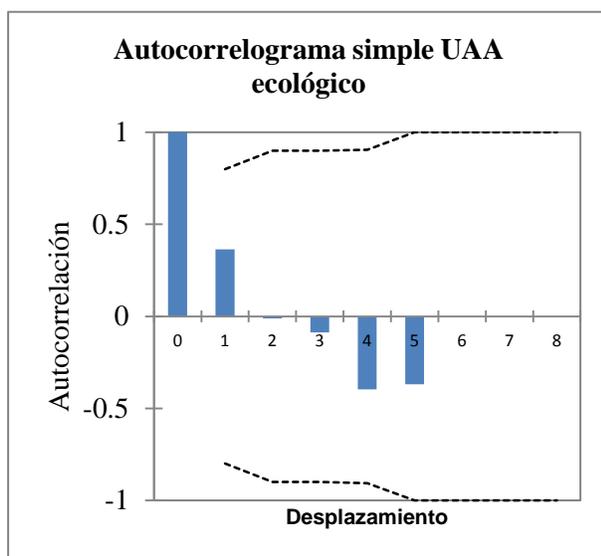
Observaciones	UAA ecológico logaritmo	ARIMA(UAA ecológico logaritmo)	Residuos	Residuos estandarizados	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
1990	2.811	2.811	0.00	0	0.000		
1995	2.855	2.879	0.02	4	-0.543		
2000	3.057	2.987	0.07	1	1.598		
2005	3.064	3.054	0.01	0	0.228		
2009	3.095	3.09	0.06	1	-1.381		
2015	3.271	3.14	0.01	9	0.436		
2025		3.17				0.044	3.142
2035		3.18				0.046	3.151
2040		3.21				0.046	3.146
2050		3.24				0.046	3.148



El histograma de residuales indica la distribución de los residuos de todas las observaciones, y en donde se determina si los datos son asimétricos o si se incluyen valores atípicos. Los residuales de la predicción del UAA ecológico indican que los valores del año 2000 y 2009 están más alejados del valor cero por lo cual son considerados como valores atípicos. El valor del UAA ecológico relaciona los valores de evapotranspiración y de servicios ambientales, y es justamente la variable de evapotranspiración la que presenta el registro de los valores más altos y bajos en durante estos años.

- Análisis descriptivo del  $UAA_{ecológico}$

Desplazamiento	Autocorrelación	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Autocorrelación parcial	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
0	1.000	0.000			1.000	0.000		
1	0.365	0.408	-0.800	0.800	0.365	0.408	-0.800	0.800
2	-0.012	0.459	-0.900	0.900	-0.167	0.408	-0.800	0.800
3	-0.086	0.459	-0.900	0.900	-0.024	0.408	-0.800	0.800
4	-0.397	0.462	-0.906	0.906	-0.420	0.408	-0.800	0.800
5	-0.370	0.516	-1.000	1.000	-0.101	0.408	-0.800	0.800
6	0.000	0.558	-1.000	1.000	0.143	0.408	-0.800	0.800
7	0.000	0.558	-1.000	1.000	-0.143	0.408	-0.800	0.800
8	0.000	0.558	-1.000	1.000	-0.106	0.408	-0.800	0.800



Las series de tiempo analizan la dependencia existente de las variables, es decir que un determinado valor depende de los valores anteriores, para medir esta dependencia se utilizan las funciones de autocorrelograma simple y autocorrelograma parcial. Basta con tener un valor significativo para que se considere que existe autocorrelación, las gráficas de autocorrelograma simple y parcial indican que valores significativos al inicio de la grafica, por lo cual se afirma que si existe una autocorrelación entre los valores.

### 3.8.2. Resultados de la serie de $UAA_{económico}$ a través de la metodología de ARIMA

- Datos del modelo

XLSTAT 2018.4.51719 - ARIMA - Comienzo: 18/06/2018 a las 06:00:55 p.m. / Final: 18/06/2018 a las 06:00:56 p.m.

Series temporales: Libro = Libro1 / Hoja = Hoja1 / Rango = Hoja1!\$D\$2:\$D\$8 / 6 filas y 1 columna

Datos de fecha: Libro = Libro1 / Hoja = Hoja1 / Rango = Hoja1!\$B\$2:\$B\$8 / 6 filas y 1 columna

Intervalos de confianza (%): 95

Centrar: Sí

Parámetros del modelo:  $p = 1 / d = 1 / q = 1 / P = 0 / D = 0 / Q = 0 / s = 0$

Optimizar: Verosimilitud (Convergencia = 0.00001 / Iteraciones = 500)

Predicción: 7

Intervalos de confianza (%): 95

Semilla (números aleatorios): 123456789

- Resultados tras la optimización

Estadísticos de bondad del ajuste:

---

Observaciones	5
GL	2
SEC	0.12530921
MEC	0.02506184
RMSE	0.15830933
Varianza RB	0.02506184
MAPE(Dif)	52.4935695
MAPE	2.80485464
	-
-2Log(Vero.)	3.03640855
FPE	0.03759276
AIC	2.96359145
AICC	26.9635915
SBC	1.79190519
Iteraciones	22

---

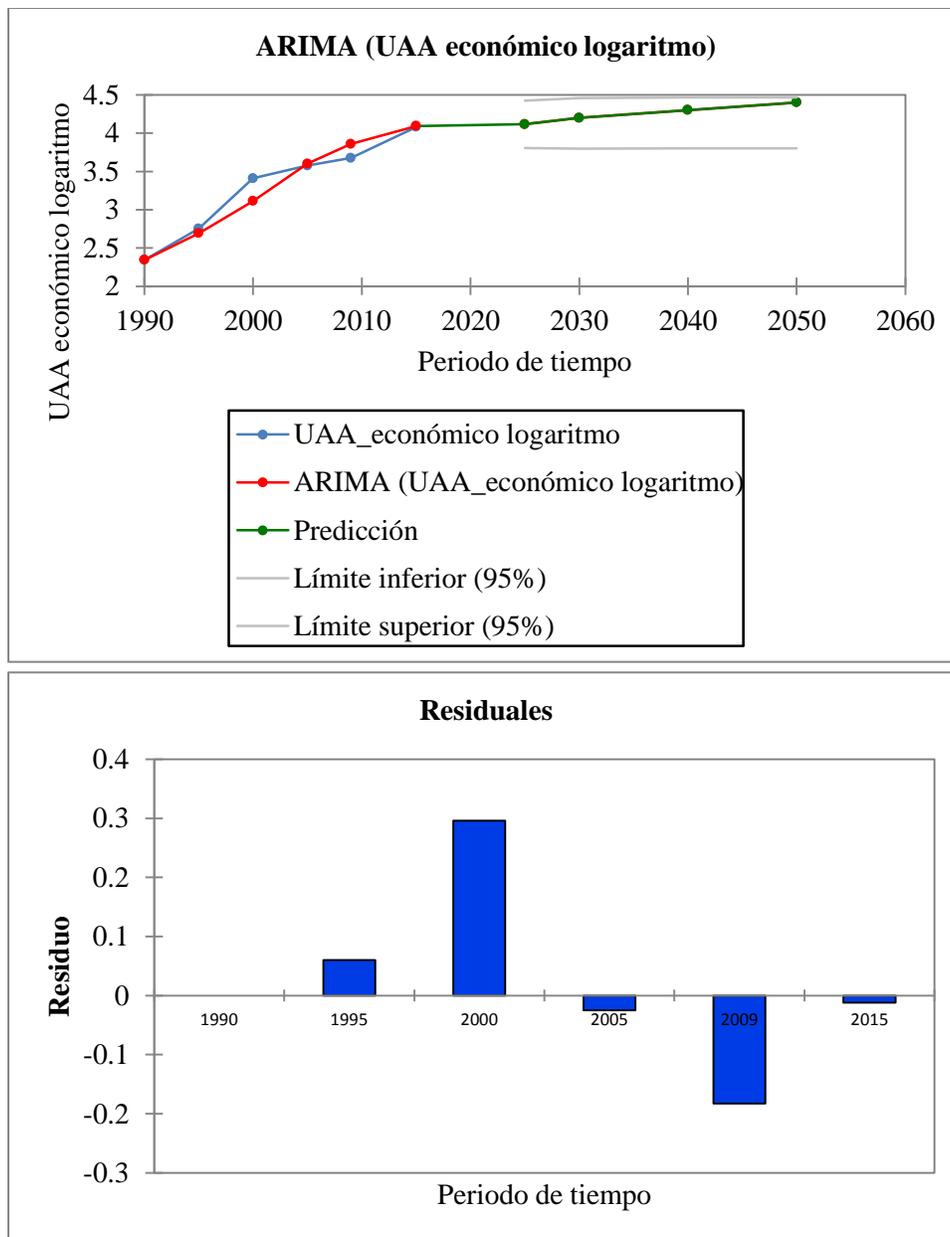
• Parámetros del modelo:

Parámetro	Valor	Error típico Hess.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
Constante	0.338	0.046	0.248	0.428

Parámetro	Valor	Error típico Hess.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Error típico asint.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
AR(1)	0.362	0.518	-0.652	1.377	0.417	-0.455	1.179
MA(1)	-1.000	0.528	-2.035	0.035	0.000	-1.000	-1.000

• Predicciones y residuos

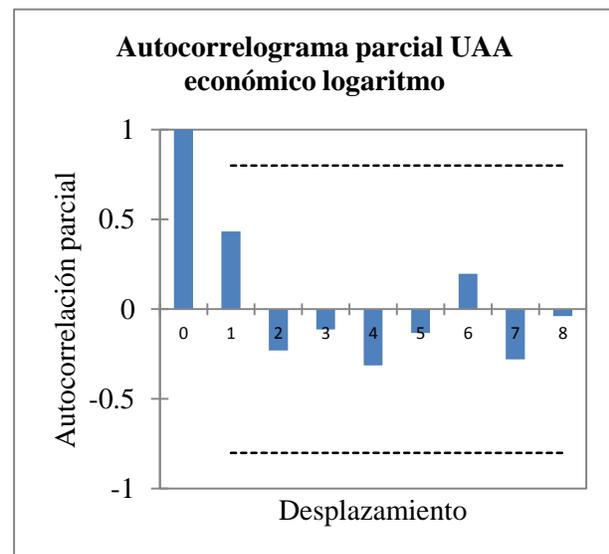
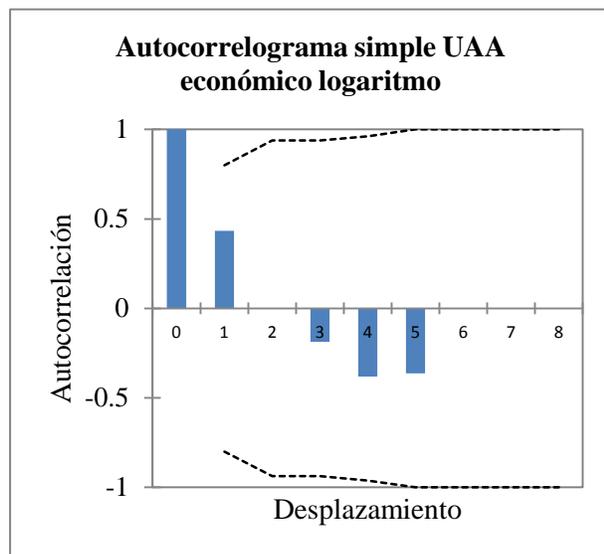
Observaciones	UAA_económico logaritmo	ARIMA(UAA_económico logaritmo)	Residuos	Residuos estandarizados	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
			0.00				
1990	2.343	2.343	0	0.000			
			0.06				
1995	2.754	2.694	0	0.380			
			0.29				
2000	3.409	3.113	6	1.868			
			-				
			0.02				
2005	3.576	3.601	5	-0.159			
			-				
			0.18				
2009	3.675	3.858	3	-1.155			
			-				
			0.01				
2015	4.081	4.093	2	-0.075			
2025		4.11			0.158	3.806	4.426
2035		4.12			0.168	3.799	4.459
2040		4.13			0.170	3.801	4.466
2050		4.14			0.170	3.802	4.468



El histograma de residuales del UAA económico muestra el mismo comportamiento que el UAA ecológico. Es decir los valores del año 2000 y 2009 están más alejados del valor cero por lo cual son considerados como valores atípicos. El valor del UAA económico relaciona los valores de evapotranspiración y de PIB, y nuevamente la variable de evapotranspiración es la que presenta el registro de los valores más altos y bajos en durante estos dos años.

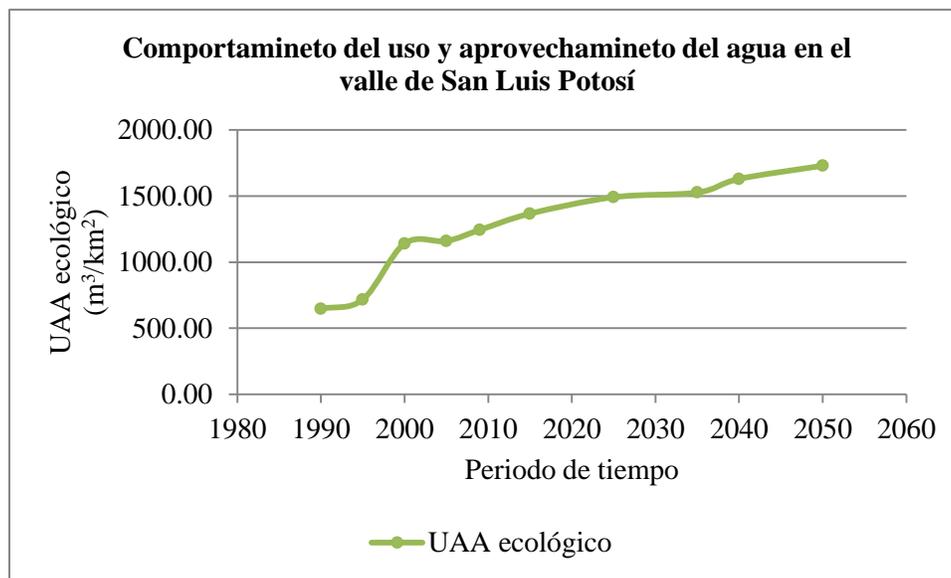
- Análisis descriptivo del  $UAA_{económico}$

Desplazamiento	Autocorrelación	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Autocorrelación parcial	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
0	1.000	0.000			1.000	0.000		
1	0.433	0.408	-0.800	0.800	0.433	0.408	-0.800	0.800
2	0.000	0.479	-0.938	0.938	-0.231	0.408	-0.800	0.800
3	-0.187	0.479	-0.938	0.938	-0.113	0.408	-0.800	0.800
4	-0.382	0.491	-0.962	0.962	-0.313	0.408	-0.800	0.800
5	-0.364	0.538	-1.000	1.000	-0.132	0.408	-0.800	0.800
6	0.000	0.577	-1.000	1.000	0.198	0.408	-0.800	0.800
7	0.000	0.577	-1.000	1.000	-0.280	0.408	-0.800	0.800
8	0.000	0.577	-1.000	1.000	-0.038	0.408	-0.800	0.800



Las gráficas de autocorrelograma simple y parcial indican que los primeros dos valores al inicio de la gráfica son significativos, por lo cual se afirma que si existe una autocorrelación entre los valores del  $UAA_{económico}$ .

Las proyecciones a futuro en materia de agua para el valle de San Luis Potosí respecto al índice del uso y aprovechamiento del agua, indican que aumentará la cobertura de  $UAA_{ecológico}$  en el área de estudio. Sobre todo para la región poniente debido al surgimiento de zonas habitacionales que incidirán en una mayor demanda del recurso hídrico, de igual manera en la región sur se prevee un incremento del  $UAA_{ecológico}$ , a causa de la instalación de nuevas plantas industriales que requieran del agua para llevar a cabo sus procesos productivos. En cuanto al  $UAA_{económico}$  la zona norte presenta los niveles más bajos del indicador, recordando que esta zona corresponde a las actividades primarias y las cuales serán blanco de desplazamiento principalmente por el incremento de la población urbana, derivando en la disminución de su cobertura. Los valores más altos del indicador son ubicados en la región centro, concerniente al área urbana del valle de San Luis Potosí. Las Gráficas 18 y 19 muestran los valores predictivos hacia el año 2050 para ambos indicadores, los valores predictivos fueron adquiridos mediante la metodología de ARIMA. Estos valores proceden de las tablas de predicciones y residuos de cada indicador, cabe resaltar que estos valores fueron transformados a notación logarítmica con el objetivo de que los datos tuvieran una mejor distribución normal. Por lo tanto, después de obtener las predicciones se aplicó un antilogaritmo para poder calcular los valores originales de los datos.



Gráfica 18. Estimación del Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico para el año 2050.

En la Gráfica 18 se muestra el comportamiento del UAA ecológico desde el año de 1990 al año 2050, es un comportamiento con una tendencia positiva. Los puntos más importantes se dan en el año de 1995 al 2000 cuando el indicador tiene un aumento de  $716 \text{ km}^2/\text{m}^3$  a  $1140 \text{ km}^2/\text{m}^3$ , revelando a este lapso de tiempo como un punto de cambio fundamental en el modelo. A partir del año 2000 se ve un incremento continuo del indicador, siendo el valor predictivo del año 2050 el más alto con un dato de  $1729.87 \text{ km}^2/\text{m}^3$ .

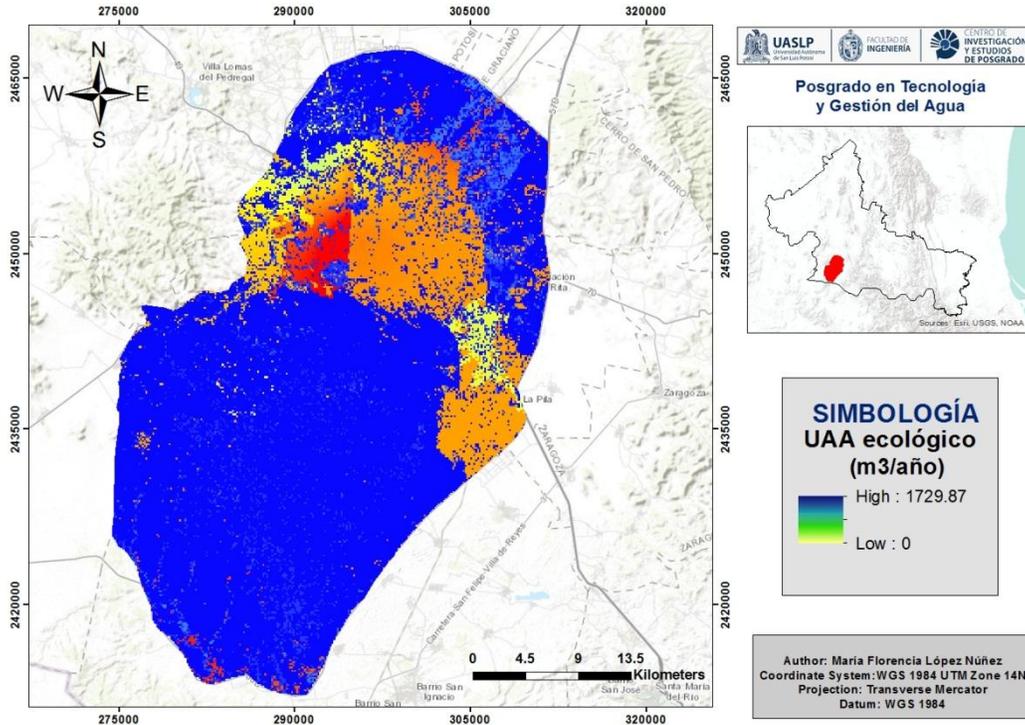
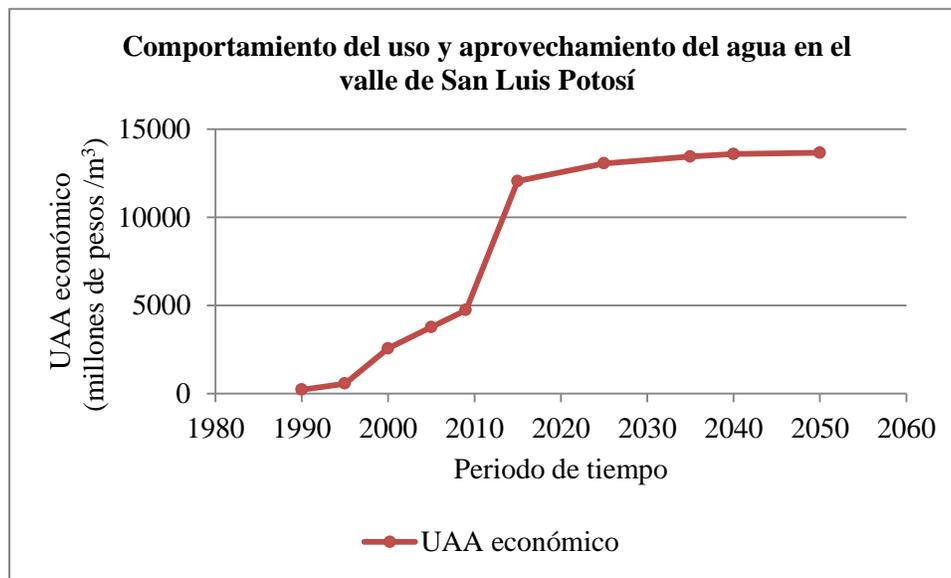


Figura 59. Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, 2050.



Gráfica 19. Estimación del Uso y Aprovechamiento del Agua Económico para el año 2050.

En la Gráfica 19 se muestra el comportamiento del UAA económico desde el año de 1990 al año 2050, al igual que con el indicador ecológico se presenta un comportamiento con una tendencia positiva. Los puntos más importantes se dan en el año de 1995 al 2000 y del 2009 al 2015, los cuales presentan los cambios drásticos del modelo de distribución espacial. El UAA económico basa sus resultados en las variables de evapotranspiración y PIB, siendo el año de 2015 el que presenta un número elevado de evapotranspiración e incremento del PIB en la región. Durante este periodo de tiempo el valle de San Luis Potosí tuvo un crecimiento económico importante dirigido principalmente en el sector industrial .

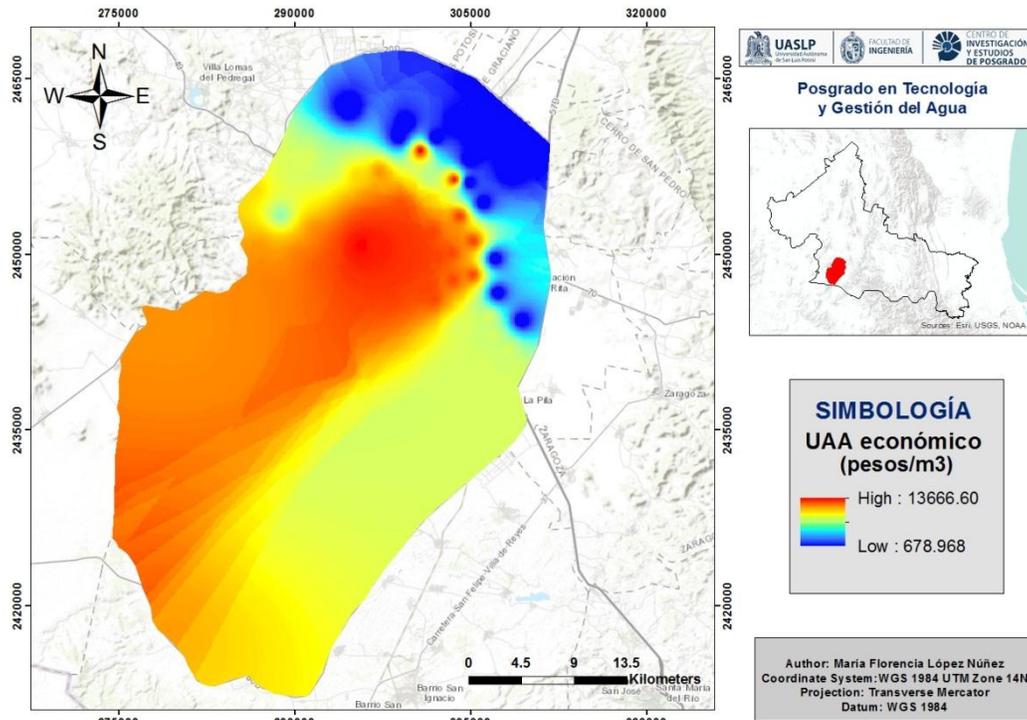


Figura 60. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, 2050.

### 3.9. Conclusión

- En el presente trabajo se determinaron cuatro variables, las cuales fueron integradas en el modelo de distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua en el valle de San Luis Potosí. Estas variables fueron la evapotranspiración (ETR), el Producto Interno Bruto (PIB), el uso de suelo, y el valor de servicios ambientales (VSA). Además de una herramienta adicional que fue el NDWI, que permitió establecer las zonas con mayor presencia de humedad en el suelo dentro del área de estudio.
- La variable de evapotranspiración, fue calculada a través de los datos de las estaciones meteorológicas de la CONAGUA. Mediante la ecuación de Turc se calculó la evapotranspiración y la distribución espacial fue estimada por medio de técnicas geoestadísticas. Dando como resultado que las zonas de mayor concentración son ubicadas al noroeste del área de estudio.
- La variable de producto interno bruto fue calculada a través de los datos anuales del PIB del estado de San Luis Potosí, mediante el uso de técnicas geoestadísticas. Dando como resultado que los valores de PIB más altos son ubicados en la zona centro del área de estudio, debido a que ahí se desarrollan las actividades secundarias y terciarias. Y los valores más bajos del PIB son ubicadas en la zona norte y sur del área de estudio, correspondientes a las actividades primarias.
- La variable de uso de suelo fue calculada a través de una clasificación digital. Indicando que la zona urbana es la que ha tenido y tiene una mayor cobertura superficial dentro del valle de San Luis Potosí. Y dentro, de los resultados más importantes fue que no se registró disminución de los cuerpos superficiales dentro del área de estudio.
- La variable de servicios ambientales calculada a través de los usos de suelo en la región, y de los volúmenes de agua destinados a estos mismos. Indica que las zonas de mayor consumo de agua son las áreas urbanas, seguido de las zonas de cultivo y de áreas verdes aunque estas últimas indican un consumo casi nulo, respecto a las otras dos categorías.
- El UAA ecológico y UAA económico identificaron que la zona más importante para ambos indicadores es la zona urbana, debido a que aquí se presentaron los valores más altos de ambos indicadores, derivado de la presión que ejerce sobre los recursos naturales. Así mismo, en las predicciones hacia el 2050 se observa que los valores más altos seguirán presentes en esta zona y que los valores del indicador serán cada vez más altos, derivado del aumento poblacional y que podría desencadenar una serie de conflictos relacionados al abastecimiento de agua.

### 3.10. Bibliografía

- Gao, B. (1996). *NDWI-A Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space*. *Remote sensing of environment*; 58(3), 257-266 p.
- McFeeters, S. (1996). *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. *Int. J. Remote Sens.* 17, 1425–143 p.
- Camaño, A. (2012). *Humedales Costeros: aportes científicos a su gestión sustentable*. Ediciones UC.
- Coutin Marie, G. (2007). *Utilización de modelos ARIMA para la vigilancia de enfermedades transmisibles*. *Revista Cubana de Salud Pública*, 33 p.
- Ocampo, D., Rivas, R. (2011). *Evaluación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en Argentina: aplicación en zonas húmedas, semiáridas y áridas*. Cuadernos del Curiham.
- Sánchez, A. (2016). *Estructura socioeconómica de México*. Grupo Editorial Patria.
- Sánchez, M. (2001). *Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile*. *Geografía Grande*, 28, 3-10 p.
- Universidad de Murcia. (2003). *Clasificación*. Recuperado de: <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema09.pdf>.
- Huang, Y., Jiang, D., Zhuang, D., Zhu, Y. y Fu, J. (2013). *An improved approach for modeling spatial distribution of water use profit-A case study in Tuhai Majia, China*. *Ecological Indicators*, 36, 94-99 p.
- Servicio Meteorológico Nacional (2018). *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)*. Recuperado de: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/enos>.
- Chuvieco, E. (1985). *Aportaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo*. In *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 5, 29-48pp.
- Hurtado, V. (2016). *Estudio de la contaminación ambiental de la ciudad de México mediante los modelos de redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos*. (Tesis de Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional. Cd. de México.

Méndez, K. (2017). *Estimación del uso y aprovechamiento del agua en el estado de San Luis Potosí a través de un modelo de distribución espacial*. (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P

## Capítulo 4. Análisis histórico de los aprovechamientos subterráneos en el valle de San Luis Potosí

### 4.1. Situación actual de la explotación del acuífero de San Luis Potosí

Como ya se mencionó en el capítulo 1, debido a las características climáticas y físicas del valle de San Luis Potosí, existe un problema de abastecimiento de agua en la región. Los cuerpos de agua superficiales son muy escasos, y solo llegan a cubrir el 16% de la demanda actual del recurso hídrico. Por lo tanto, el agua subterránea para el valle de San Luis Potosí es de suma importancia para el desarrollo económico y social. El acuífero San Luis Potosí, con clave 24111, es la fuente de abastecimiento más importante del Estado. Según CONAGUA (2017), “En la actualidad, cuatro de cada diez potosinos dependen del abastecimiento de este acuífero y uno de cada dos habitantes urbanos del Estado vive en esta región”. El acuífero San Luis Potosí tiene un área aproximada de 2,061 km<sup>2</sup>. Abarca totalmente el Municipio de Soledad de Graciano Sánchez, la mayor parte de los Municipios de San Luis Potosí y cerro de San Pedro, y una pequeña fracción de los Municipios de Mexquitic de Carmona, Ahualulco y Villa de Zaragoza. En la Figura 61 se muestra la ubicación del acuífero San Luis 24111.

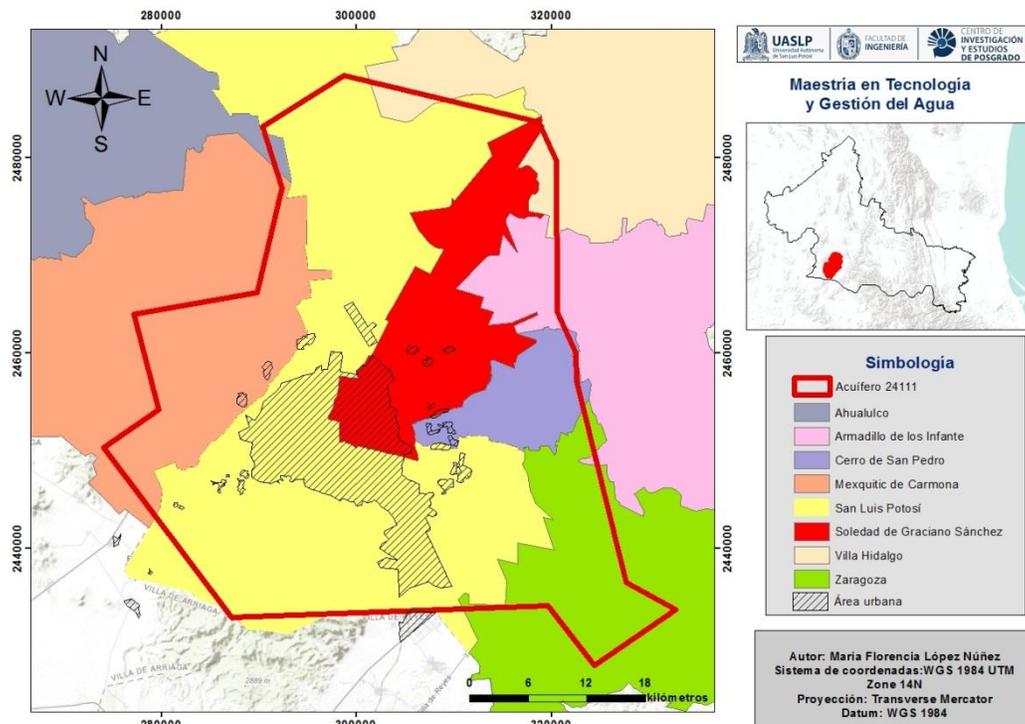


Figura 61. Acuífero San Luis, clave 24111.

La mayor parte del acuífero se encuentra localizado por debajo de la zona urbana de la capital potosina, por lo cual se considera al factor de la urbanización como un detonante para la serie de conflictos que se vienen presentando desde hace décadas. El crecimiento exponencial de la población en el valle de San Luis Potosí, durante las últimas tres décadas ha sido tan desmesurado, que tuvo un aumento del 60 % de población del año de 1990 al 2010, como puede observarse en la Tabla 9. La ciudad también creció en superficie pasando de 1,760 hectáreas en el año de 1960 a 14,000 hectáreas en el año 2000, desplazando áreas de cultivo hacia el norte del valle (CONAGUA, 2018). Así mismo, se intensificó el establecimiento de diversas empresas de servicios que trajeron consigo una importante oferta de empleo.

Tabla 9. Dinámica poblacional en el valle de San Luis Potosí (CONAGUA, 2018).

Municipios principales	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Cerro de San Pedro	3,302	2,105	1,975	1,938	2,274	3,404	3,148
Soledad de Graciano Sánchez	10,208	12,591	29,061	64,414	139,979	180,296	269,512
San Luis Potosí	155,238	193,670	267,951	406,630	525,733	670,532	785,010
Total Zona centro de San Luis Potosí	168,478	208,366	298,987	472,982	660,986	854,232	1,059,680
Población del Estado de San Luis Potosí	856,066	1,048,297	1,281,996	1,673,893	2,003,137	2,299,360	2,495,513

El acuífero se encuentra gravemente sobreexplotado, derivado de un aumento de concentración de aprovechamientos subterráneos, así como de la contaminación de los mismos. Entre los efectos más documentados se encuentran el agotamiento del recurso, modificación del sistema de flujo subterráneo, desaparición de algunos manantiales, hundimiento del terreno, grietas y extracción del agua con mayor concentración de elementos como el flúor. De hecho, el 95% de la superficie que comprende el acuífero fue establecida como zona vedada, mediante cuatro Decretos Presidenciales:

- “Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región denominada valle de San Luis Potosí, S.L.P.” con fecha del 30 de junio de 1961.
- “Decreto que amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo, establecida en la región del valle de San Luis Potosí, según Decreto del 2 de junio de 1961”. Con fecha del 18 de octubre de 1962.
- “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos del Municipio de Venado y de las zonas no vedadas por el diverso publicado el día 30 de junio de 1961, en los Municipios de Mexquitic, Ahualulco, Moctezuma y Villa de Arista, S.L.P. para el mejor aprovechamiento de las aguas del subsuelo de dichas zonas”. Con fecha del 7 de septiembre de 1974.

- “Decreto por el que se declara de interés público la conservación de los mantos acuíferos de la parte que corresponde a los Municipios de Villa de Reyes y San Luis Potosí, S.L.P. y en las zonas no vedadas por los Decretos que se señalan”. Con fecha del 3 de diciembre de 1985.

## **4.2. Dinámica de los aprovechamientos subterráneos en las últimas tres décadas**

A continuación, se presenta una recopilación de los aprovechamientos subterráneos en el valle de San Luis Potosí. La información fue proporcionada por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el organismo Intermunicipal Metropolitano de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Servicios Conexos de los municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez (INTERAPAS).

La información procedente de la CONAGUA consta de un censo histórico de los aprovechamientos subterráneos realizado en el año 2010 dentro del acuífero de San Luis Potosí, se cuenta con registro de las profundidades y de los gastos con los que se han operado. Además de un censo piezométrico realizado desde el año de 1995 al 2007 para algunos aprovechamientos subterráneos. Así mismo, se utilizó la información procedente de la base de datos del REPDA en la que se especifica los usos y aprovechamientos a los que se destina el agua subterránea, cabe destacar que estos datos son considerados como los pozos actuales que se encuentran en operación.

En el caso de INTERAPAS solo se obtuvieron registros de aprovechamientos considerados como de uso público urbano. También se incluyó la información proporcionada por entidades educativas como la UASLP que contaba con registros de las profundidades con las que trabajan los aprovechamientos subterráneos más actuales.

Por lo tanto, el análisis que se presenta a continuación es una compilación de los diversos fragmentos de información que se tiene en las distintas dependencias encargadas de la gestión del agua dentro del valle. Primeramente se presentan en las Figuras 62 y 63 el análisis del censo histórico de los aprovechamientos subterráneos, mediante la profundidad y los gastos registrados en el acuífero San Luis, 2411 dentro del área de estudio.

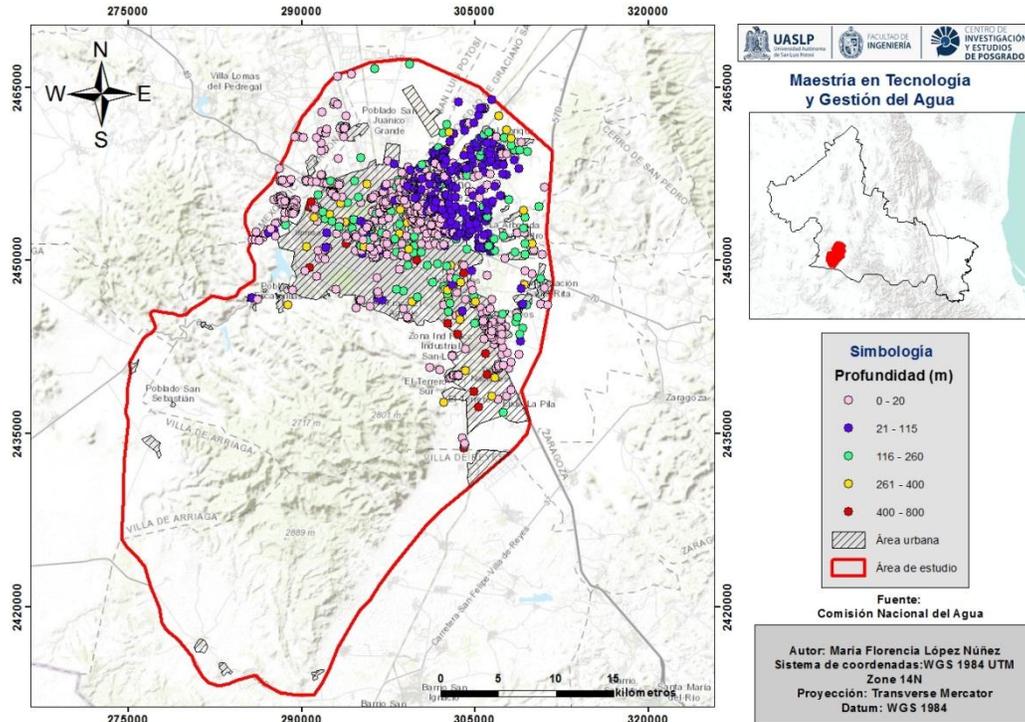


Figura 62. Censo de los aprovechamientos subterráneos y profundidades en el valle de San Luis Potosí.

Se tiene un total de 1120 aprovechamientos subterráneos registrados dentro del área de estudio, de los cuales 584 aprovechamientos no sobrepasan los 20 m de profundidad; 382 aprovechamientos son registrados con profundidades de 21 a 115 m; 36 aprovechamientos son registrados con profundidades de 261 a 400 m y solo 22 pozos tienen registro de profundidades de 401 a 800m. Se infiere que los aprovechamientos con profundidades menores, son aquellos primeros pozos de los que se tiene registro. Los aprovechamientos con profundidades superiores a los 100 m, son ubicados principalmente en el Municipio de Soledad de Graciano Sánchez que corresponden a las zonas agrícolas. Los aprovechamientos con profundidades mayores a los 200 m, son considerados como los pozos más actuales.

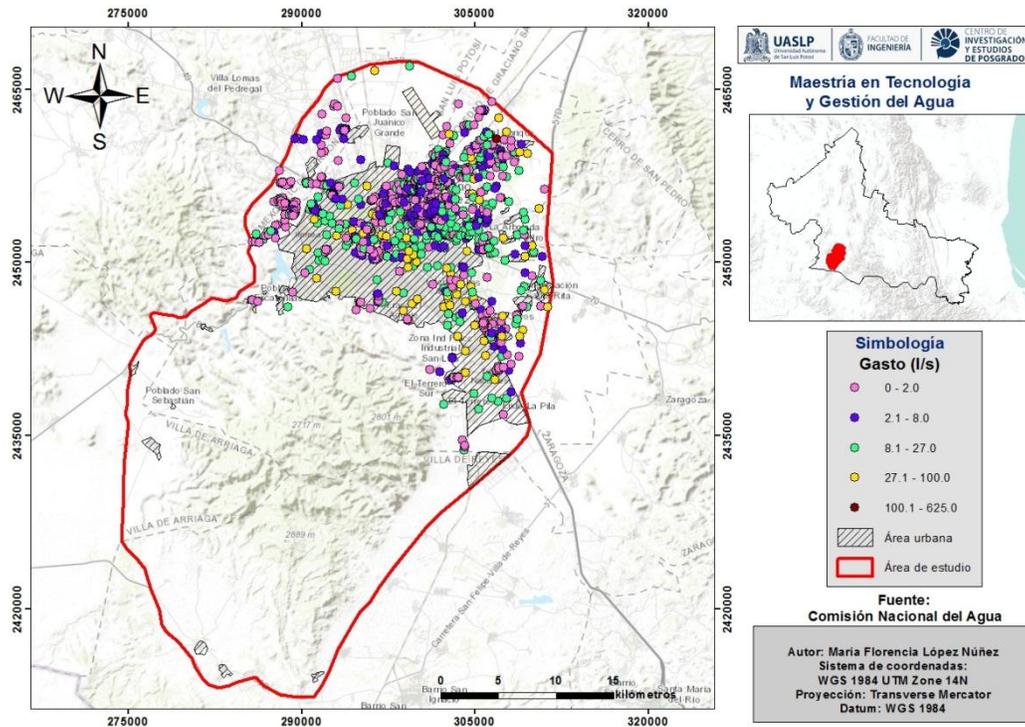


Figura 63. Censo de los aprovechamientos subterráneos y gastos en el valle de San Luis Potosí.

En lo referente a los gastos, se tiene registro de 506 aprovechamientos los cuales generaron gastos de 0 a 2 litros por segundo; 284 aprovechamientos generaban de 2.1 a 8 litros por segundo; 250 aprovechamientos generaban un gasto de 8.1 a 27 litros por segundo; 78 aprovechamientos generaban un gasto de 27.1 a 100 litros. El mayor gasto registrado se ubica en la localidad Fracción general Enrique Estrada. La información de aguas subterráneas (profundidad y gastos) censadas para el año de 2010, fue proporcionada por la CONAGUA.

En la Figura 64, se muestran los datos recabados de la red de monitoreo piezométrico de CONAGUA, para el valle de San Luis Potosí. Estos datos pertenecen a un total de 52 aprovechamientos subterráneos los cuales, han sido monitoreados del año de 1995 al año del 2007. Se encontró que 35 aprovechamientos aumentaron su nivel piezométrico; 10 aprovechamientos disminuyeron su nivel piezométrico y 7 permanecieron constantes. No todos los aprovechamientos fueron monitoreados durante los mismos años, incluso algunos solo llegaron a tener una sola medición. Se observa que alguno de los aprovechamientos que disminuyeron su nivel piezométrico se encuentran cercanos a aquellos que mostraron un comportamiento totalmente diferente es decir, que aumentaron el nivel piezométrico. Se puede inferir que algunos aprovechamientos subterráneos fueron clausurados y lo cual permitió que el nivel piezométrico aumentara, sin embargo no se cuenta con registros de clausura de aprovechamientos y por lo tanto no es posible aseverar esta idea. Actualmente estos datos piezométricos pudieron haber cambiado drásticamente, derivado del crecimiento urbano en la ciudad. Sin embargo, son indicador del comportamiento de las aguas subterráneas de la mitad de la década de los noventa y dos mil.

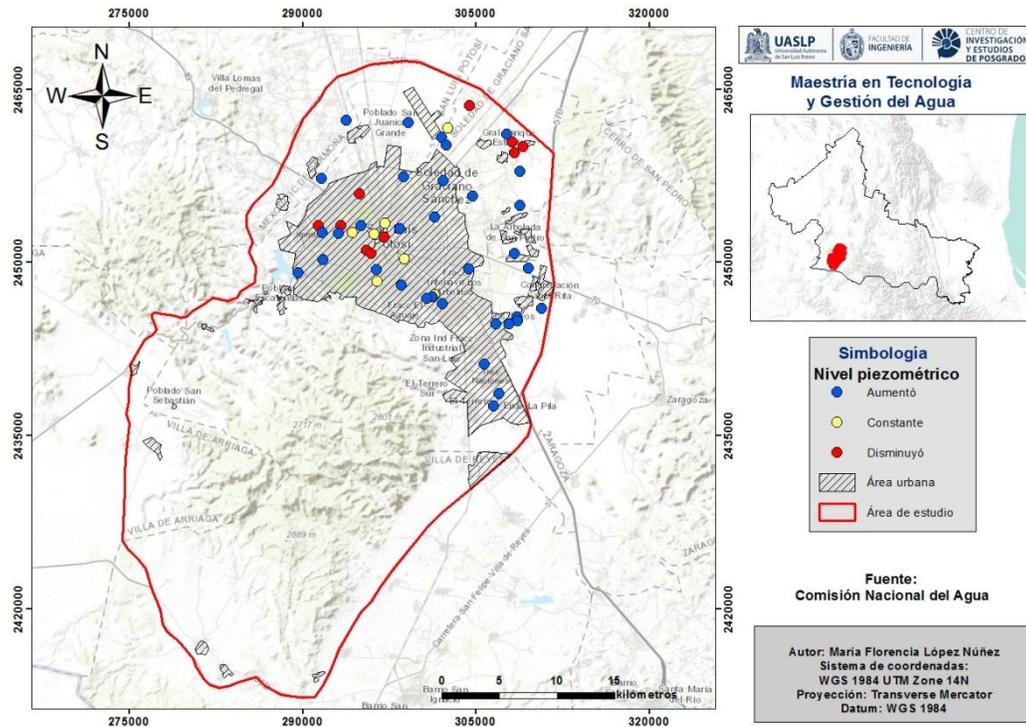


Figura 64. Nivel Piezométrico de los aprovechamientos subterráneos del periodo de 1995 a 2007.

También se tiene información proporcionada por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y de INTERAPAS en relación a los aprovechamientos subterráneos actuales y en operación. Cabe destacar que estos aprovechamientos solo corresponden a aquellos clasificados como Publico-Urbano. En la Figura 65 se muestran los 110 aprovechamientos en el área de estudio, 15 aprovechamientos comprenden profundidades de 60 a 200m; 46 aprovechamientos comprenden profundidades de 201 a 329m; 30 aprovechamientos comprenden profundidades de 450 a 600m y 19 aprovechamientos comprenden las profundidades más grandes de 600 a 1180m.

Según el censo del 2010 la mayor profundidad era de 800m, para el año 2018 la mayor profundidad es de 1180 m y corresponde al pozo La Rivera, ubicado en el Fraccionamiento La Rivera en el Municipio de Soledad de Graciano Sánchez. En la Figura 65 se presenta la ubicación y profundidades de los aprovechamientos subterráneos y en la Figura 66 la profundidad es representada a través de un modelo tridimensional.

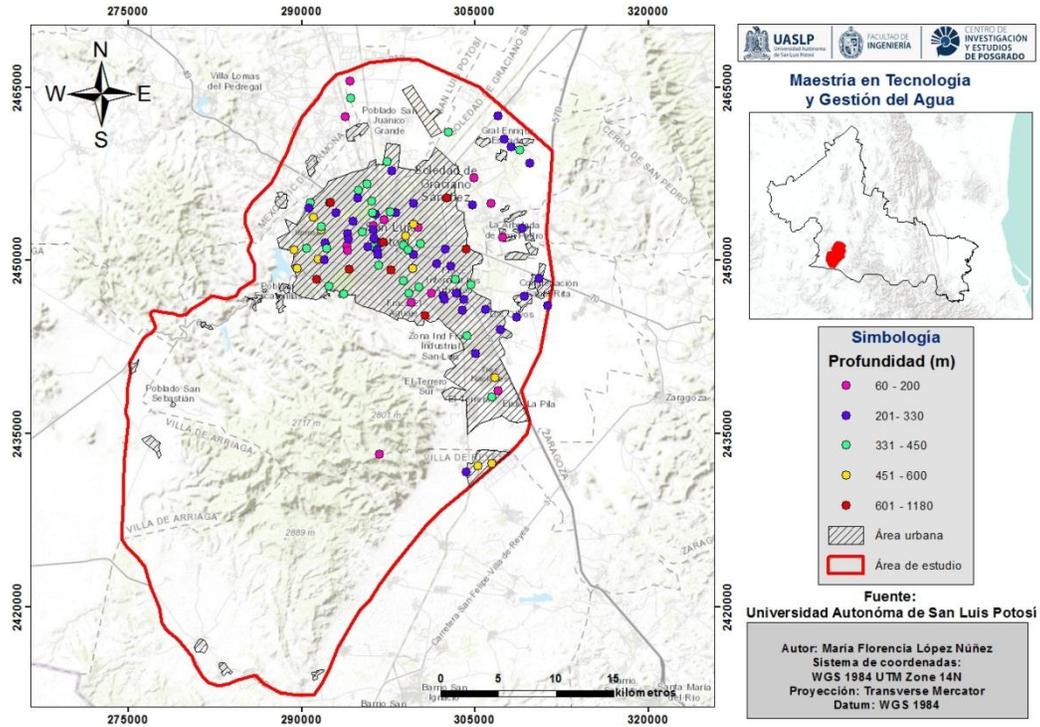


Figura 65. Aprovechamientos subterráneos actuales en el valle de San Luis Potosí.

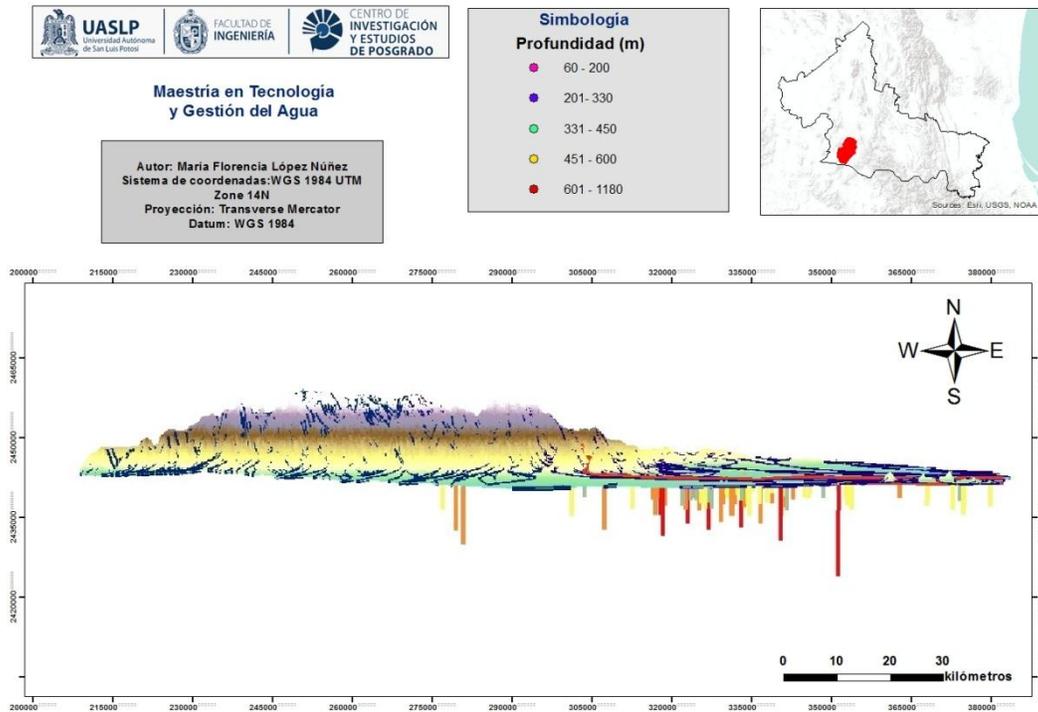


Figura 66. Modelo tridimensional de la profundidad de los aprovechamientos subterráneos en el valle de San Luis Potosí.

### 4.3. Principales usos y aprovechamientos del agua en el valle de San Luis Potosí

A través de la base de datos del Registro Público de Derechos del Agua (REPGA), se obtuvieron los principales usos a los cuales se destinan las aguas provenientes de los aprovechamientos subterráneos. Se cuenta con un total de 1239 aprovechamientos registrados para el valle de San Luis Potosí. Estos datos son provenientes de un censo histórico realizado en el año 2010. Alrededor de 760 aprovechamientos son reservados a la agricultura por lo tanto, es considerado como el principal uso del agua para el valle de San Luis Potosí; le sigue el uso público urbano con 191 aprovechamientos, para uso industrial se cuenta con 105 aprovechamientos; el uso pecuario tiene 72 aprovechamientos para su desarrollo; el uso doméstico cuenta con 48 aprovechamientos; y los usos de acuicultura y múltiples cuentan con tres aprovechamientos consignados para su procesos. En la Figura 67 se muestra la información anteriormente mencionada.

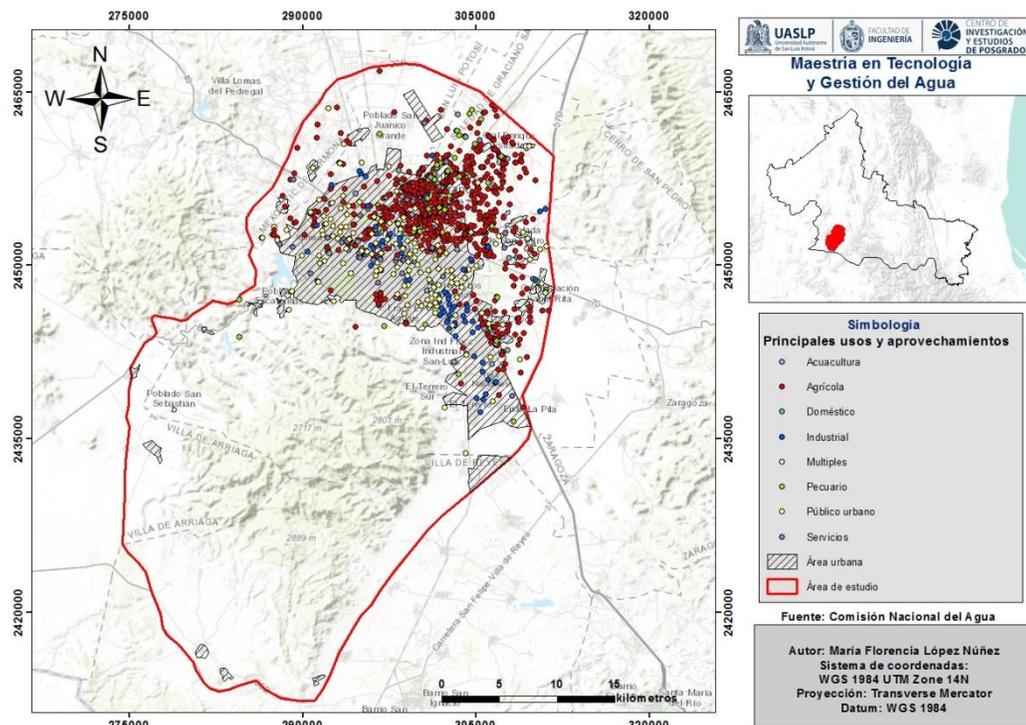


Figura 67. Usos y aprovechamientos del agua en el valle de San Luis Potosí.

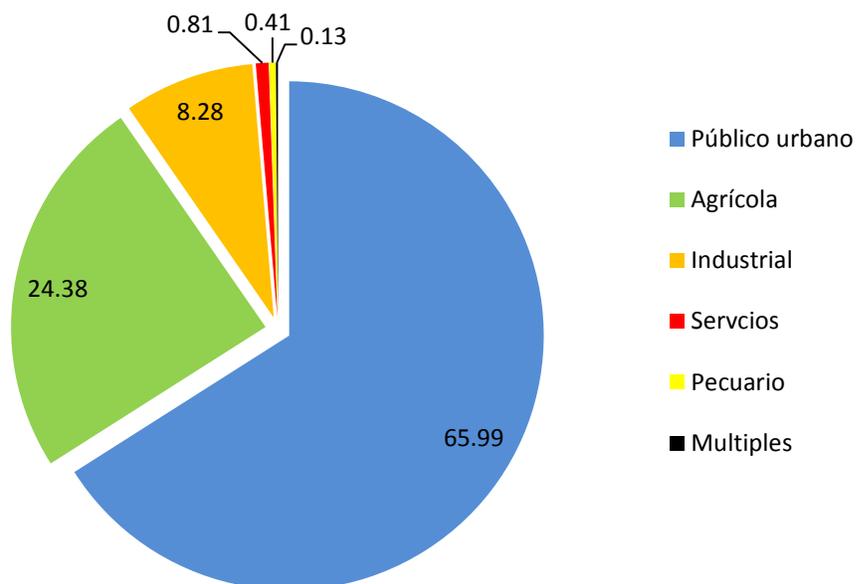
Conagua (2018) ha establecido que el acuífero San Luis Potosí, clave 24111, es explotado a través de 652 captaciones de agua subterránea en la unidad somera y en la unidad profunda. Los aprovechamientos subterráneos son distribuidos como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Usos y aprovechamientos del agua en el acuífero San Luis Potosí, 24111.

Total de aprovechamientos subterráneos	Unidad somera	Unidad profunda
652	282	370
Aprovechamientos subterráneos distribuidos según los usos del agua		
<b>Público urbano</b>	4	153
<b>Agrícola</b>	158	122
<b>Industrial</b>	5	49
<b>Agroindustrial</b>	3	1
<b>Servicios</b>	30	30
<b>Pecuario</b>	22	12
<b>Doméstico</b>	51	0
<b>Múltiples</b>	9	3
<b>Volumen de extracción (millones de m<sup>3</sup>/año)</b>	5.1	148.5

Cabe resaltar que estos datos corresponden al total de aprovechamientos subterráneos dentro del acuífero San Luis, clave 24111 y por lo tanto, difieren en cantidad de los utilizados en el área de estudio. Por otro lado, conforme a la información recaba por CONAGUA (2018), el total del volumen de extracción se distribuye como se indica en la Gráfica 9.

Extracción total del agua subterránea y su distribución según el uso del agua



Gráfica 20. Distribución del agua extraída de aprovechamientos subterráneos.

Aunque las actividades agrícolas presentan un mayor número de pozos destinados a su desarrollo tanto en la unidad somera como profunda, la extracción de agua no es comparable a la destinada para el uso urbano. Resulta alarmante que se extraiga un poco más de 150 millones de metros cúbicos anuales del acuífero de San Luis Potosí, cuando la recarga natural del acuífero es de solo 78 millones de metros cúbicos al año. Claramente las cifras nos indican que existe un déficit de disponibilidad de agua, por lo que no es posible otorgar nuevas concesiones ni incrementar el volumen de las ya existentes en el acuífero (CONAGUA, 2018).

#### **4.4. Conclusión**

- De acuerdo a diversos estudios generados por dependencias gubernamentales, educativas y privadas, respecto al acuífero San Luis Potosí, indican la presencia de sobreexplotación de sus cuerpos subterráneos. Derivado de la exorbitante extracción del recurso hídrico, la cual supera la recarga natural del acuífero y que viene ocurriendo desde ya hace varias décadas.
- El acuífero presenta distintas condiciones y tipos de explotación, ritmos de abatimiento, concentración de captaciones y extracción para diversos usos del agua. Si la gestión del agua no cambia, se corre el riesgo de generar impactos negativos sobre la población y el medio ambiente, con lo que se frena y compromete el desarrollo sostenible del valle de San Luis Potosí.
- Los censos históricos del aprovechamiento subterráneos indican que los primeros aprovechamientos que se establecieron se encontraban a profundidades menores, correspondientes a la unidad somera. Y los aprovechamientos actuales en su mayoría operan en la unidad profunda, identificando una disminución del agua subterránea.
- El monitoreo piezométrico llevado a cabo por las dependencias gubernamentales, ha resultado insuficiente debido a que no todos los aprovechamientos han sido monitoreados correctamente, aunado a la falta de datos del año 2008 a la fecha. Los datos que se analizaron indican que el 67% de los aprovechamientos monitoreados aumentaron su nivel piezométrico; 19% disminuyeron su nivel piezométrico y 14 % permanecieron constantes. Es muy probable que aquellos aprovechamientos que disminuyeron su nivel piezométrico, estuvieron sujetos a una clausura y por lo tanto el nivel de agua aumentó. Sin embargo no es posible aseverar este argumento debido que no se cuentan con registro de pozos clausurados.

## Conclusiones

La presente Tesis tuvo como objetivo generar un modelo para analizar la distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua para el valle de San Luis Potosí, el cual ayudo a comprender el comportamiento del recurso hídrico en la región. Por lo cual se determina que la hipótesis es aceptada, ya que a través de la asociación de cuatro variables se determinó los usos y aprovechamientos del agua en el valle de San Luis Potosí. Las variables que fueron integradas al modelo de distribución espacial, se seleccionaron con base a la metodología de *Huang et al.*, (2013) y de la metodología de Méndez (2017), ambos autores utilizaron el índice del uso y aprovechamiento del agua para estimar la dinámica del agua dentro de sectores económicos, sociales y naturales, de ahí que el presente trabajo sustente la base de su estudio en este indicador como una fuente primordial para el manejo del agua.

Como primer paso se delimitó a través del uso de un SIG las subcuencas que conforman el valle de San Luis Potosí, así como sus drenajes y corrientes principales. Dichas subcuencas son la Presa de San José, Presa de San Pablo y Rio Santa María Alto. La identificación de las subcuencas que conforman el área de estudio, permitió tener una mejor comprensión para la búsqueda de alternativas en el manejo y gestión del agua en sus captaciones naturales, dada su vinculación con los ecosistemas y las actividades antropogénicas de la región.

El uso de técnicas geoespaciales como la percepción remota y el análisis geoestadístico desempeñaron un papel importante en la identificación del comportamiento espacial del recurso hídrico a través de procesos de simulación espacial aplicados en las variables estudiadas. Posteriormente las variables fueron ingresadas en el modelo de distribución espacial, el cual logró identificar que el principal factor que condiciona el comportamiento del agua dentro del valle es el sector urbano. Debido a que, es a donde se destina un mayor volumen de agua y el cual presentará un crecimiento exorbitante en las próximas décadas. Las variables del producto interno bruto, la evapotranspiración, el uso de suelo y los servicios ambientales lograron establecer una relación entre los factores ecológicos, económicos, y sociales que convergen en el valle.

- La variable del producto interno bruto ayudó a identificar el crecimiento económico en la región, y asociarlo con el volumen de agua que es destinado a las actividades económicas descritas. Según el resultado del análisis, las actividades terciarias es el sector al que se le destina un mayor volumen.
- La variable de evapotranspiración determinó que la zona norte es donde existe una mayor concentración espacial de evapotranspiración.

- La variable de uso de suelo examinó el crecimiento superficial de la mancha urbana en el valle de San Luis Potosí, y la cual llegó a ocupar una superficie superior al 44% del área de estudio.
- La variable de servicios ambientales asocia el volumen de agua que se destina en dependencia al uso de suelo, indicando que el sector urbano es al que se le dedica un mayor volumen de agua.

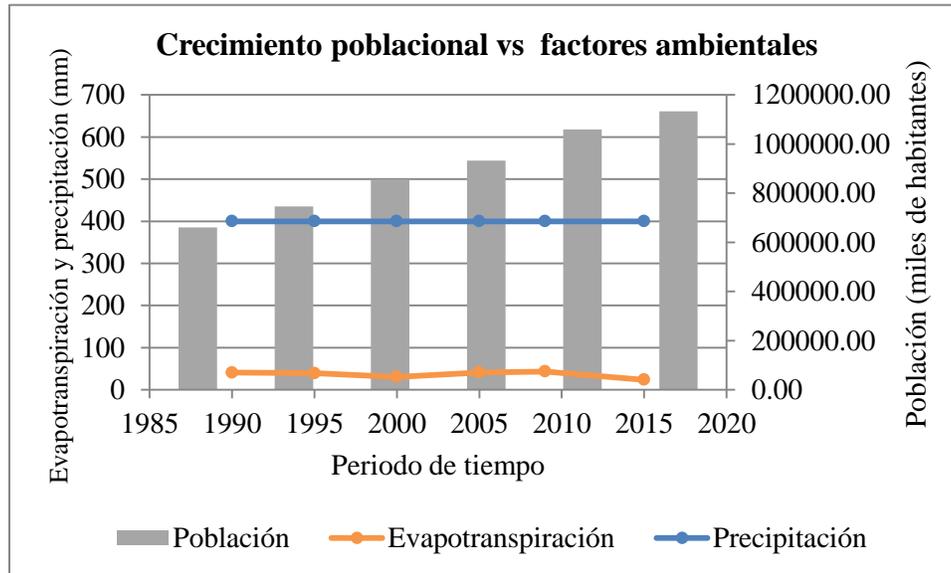
Por otro lado, la metodología de ARIMA fue utilizada para generar la predicción de los indicadores de UUA ecológico y económico, ya que es considerada como una de las principales técnicas para la predicción de series de tiempo, debido a que ofrece ciertas ventajas como el manejo de datos reducidos y el trabajar con series estacionales y no estacionales. Aunque existen otras metodologías para el análisis de series de tiempo como redes neuronales, descomposición, promedios móviles, regresión lineal, etc., no pudieron ser ejecutadas debido al que se tenía un número de datos reducidos.

El análisis multitemporal de los aprovechamientos subterráneos identificó como se ha dado el manejo al recurso hídrico subterráneos en las últimas tres décadas, con el objetivo de establecer un mejor conocimiento en el proceso de gestión, conocer sobre la distribución del recurso en el valle de San Luis Potosí según sus condiciones temporales y sobre todo de efectuar una importante reflexión para el establecimiento de nuevos mecanismos del aprovechamiento del agua, si se quiere asegurar la preservación del recurso hídrico en un futuro. De esta manera, se identificó que los aprovechamientos subterráneos destinan un mayor volumen de agua al sector urbano, seguido del agrícola y del industrial para la región del valle de San Luis Potosí. El acuífero del cual se extrae el agua es considerado actualmente como sobreexplotado. Las Gráficas 21, 22 y 23 muestran el comportamiento general de las variables ambientales (evapotranspiración y precipitación) y de las variables antropogénicas (PIB y VSA) durante el periodo de estudio, y donde claramente se observa que las variables antropogénicas rebasaron la capacidad de las variables ambientales para solventar los servicios que necesitan la población, la industria y los ecosistemas.

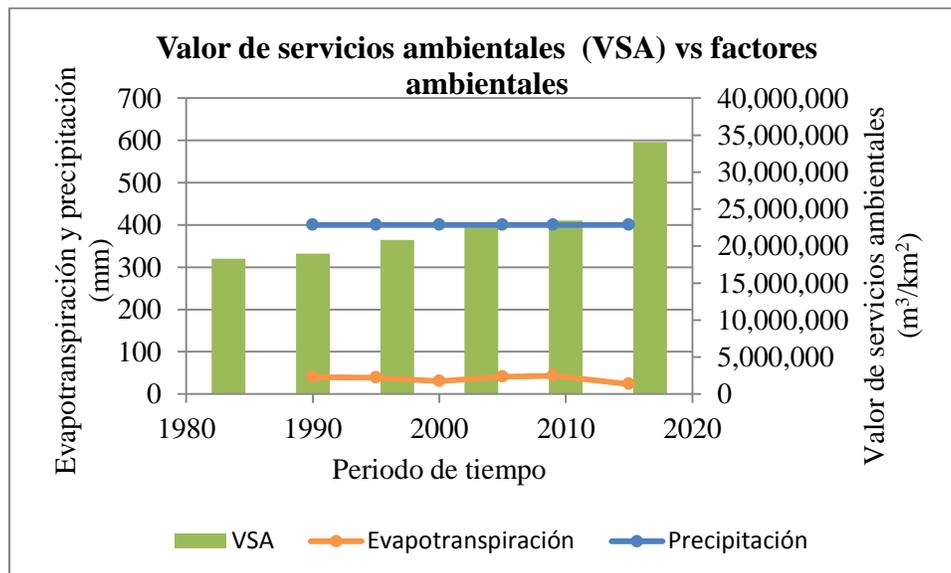
La importancia de realizar un análisis multitemporal es que ayuda a comprender las condiciones de un fenómeno de estudio en el pasado y su proyección en un futuro. Por consiguiente el análisis multitemporal es un instrumento de monitoreo en el tiempo y de gestión en la planificación territorial.

Se recomienda que en futuros trabajos de investigación los periodos de tiempo sean más continuos, es decir que el lapso de tiempo sea de por lo menos dos años con el propósito de tener un análisis persistente del recurso hídrico. Además, de la posible incorporación de variables adicionales al modelo de distribución espacial, que relacionen las principales problemáticas contribuyendo al mejor conocimiento de alternativas en el proceso de gestión integral del agua como de la construcción de una nueva ideología para una mejor gobernanza de la misma.

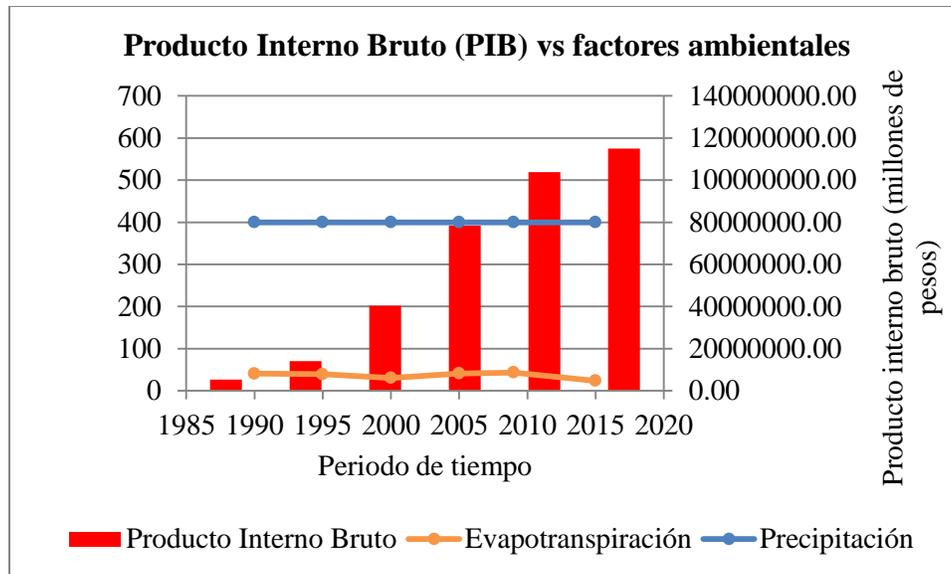
En las siguientes gráficas (21, 22 y 23) se podrá percibir el patrón de comportamiento que sintetiza el como a través del tiempo con los mismos recursos de agua, se ha incrementado la problemática del uso y aprovechamiento del recurso y la forma en que el déficit del mismo recurso se ha agudizado conforme crece la población, por la demanda de los servicios ambientales incrementados como el uso y aprovechamiento requerido por las actividades económicas crecientes en las tres últimas décadas en el valle de San Luis Potosí.



Gráfica 21. Análisis del crecimiento poblacional y los factores ambientales para el valle de San Luis Potosí.



Gráfica 22. Análisis de los valores de servicios ambientales y de los factores ambientales para el valle de San Luis Potosí.



Gráfica 23. Análisis del PIB y los factores ambientales para el valle de San Luis Potosí.

Cabe señalar finalmente que este trabajo de investigación tuvo a bien concentrarse en alternativas de sustentabilidad y establecerse dentro de las tendencias mundiales de la gestión integral del agua, su adecuada gobernanza y el derecho a la misma.

Las estrategias planteadas siempre serán insuficientes mientras no se establezca una clara y normada gobernanza del uso y aprovechamiento del recurso. Así mismo, es necesario cambiar ciertas políticas y romper con paradigmas en cuanto a la gestión y distribución del recurso en las poblaciones ya que de lo contrario la ideología hacia la sustentabilidad no podrá establecerse.

## Referencias

- Abbasnia, A., Radfard, M., Hossein, A., Nabizadeh, R., Yousefi, M., Soleimani, H., y Alimohammadi, M. (2018). *Groundwater quality assessment for irrigation purposes based on irrigation water quality index and its zoning with GIS in the villages of Chabahar, Sistan and Baluchistan, Iran*. *Data inBrief* 19, 623–631 p.
- Aguilar, H., Zamora, y Vargas, C. (2014). *Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapid eye, Spot, Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI*. *Revista Geográfica de América Central*, 53, 39-59 p.
- Aguirre, R. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. Cd. de México, México. Universidad Autónoma de México. Instituto de geografía.
- Alcántara, I. (Ed.). (2009). *Los Sistemas de Información Geográfica en la prevención de desastres: perspectivas y realidades*. UNAM, Instituto de Geografía. Cd. de México, México.
- Ambrosio, G., González, J. y Arévalo, V. (2002). *Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la teledetección de cambios en una serie temporal*. Málaga, España.
- Boninsegna, J., y Villalba, R. (2006). *Documento marco sobre la oferta hídrica en los oasis de riego de Mendoza y San Juan*. Los condicionantes geográficos y climáticos. Proyecto de desarrollo de escenarios climáticos y estudios de vulnerabilidad. Fundación T. Di Tella-SAyDS.
- Burrough, P. y McDonnell. (1998). *Principles of geographical information systems*. *Economic Geography*, 75(4), 422 p.
- Camaño, A. (2012). *Humedales Costeros: aportes científicos a su gestión sustentable*. Ediciones UC.
- Cano, L., y Escobar, J. (2011). *Diseño de Redes de Monitoreo Apoyadas por Herramientas SIG y Modelación Geoespacial*. Universidad de Antioquia. Colombia.
- Cardona, A. (1990). *Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo: México*. (Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Nuevo León.

- Carita, G. (2017). *Variabilidad espacio-temporal de la calidad de agua subterránea en el valle de Lurín*. Tesis de licenciatura. Lima, Perú. Universidad Agraria la Molina.
- Carrillo, J. (1992). *The Hydrogeology of the San Luis Potosi Area, Mexico*. (Tesis Doctoral). University of London United Kingdom.
- Carrillo, J., Cardona, A., y Edmunds, W. (2002). *Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí, Basin, Mexico*. Journal of hidrology, 261 (1-4), 24-47 p.
- Carrillo, J., Cardona, A., y Edmunds, W. (2002). Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí, Basin, Mexico. Journal of hidrology, 261 (1-4), 24-47 p.
- Castillo, O. (2012). *Aplicación espectral y topológica en el procesamiento de imágenes satélites*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.
- Chuvieco, E. (1985). *Aportaciones de la Teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo*. In Anales de Geografía de la Universidad Complutense 5, 29-48pp.
- Cimmery, V. (2010). *User Guide for SAGA*. Version 2.0.
- Comisión Nacional del Agua (México). (2016). *Estadísticas del agua en México, edición 2016*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Acuerdo por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí*. San Luis Potosí, S.L.P.
- Connor, R. (2015). *The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world* (Vol. 1). UNESCO.
- Curi, S. (2017). *Caracterización de las sequías hidrológicas en la vertiente peruana del Océano Pacífico*. Tesis de licenciatura. Lima, Perú. Universidad Agraria la Molina.
- Del Aguila, E. (2014). *Comparación de la delimitación de la micro cuenca " El zancudal" con Hidrology y Archydro Tools en el Cicfor-Macuya*.
- Díez, A. (2001). *Geomorfología e hidrología fluvial del rio Alberche: modelos y SIG para la gestión de riberas*. (Tesis Doctoral). Universidad complutense de Madrid. Madrid, España.

- Dourojeanni, A. (1994). *Políticas públicas para el desarrollo sustentable de la gestión integrada de los recursos hídricos*.
- ESRI. (2016). *Comparar métodos de interpolación*. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/comparing-interpolation-methods.htm>
- FAO. 2011. *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura*. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, y Mundi-Prensa, Madrid
- Gary, W. (2016). *HEC-RAS. River Analysis System User's Manual*.
- Global Water Partnership. (2011). *¿Qué es la GIRH?* Recuperado de: <https://www.gwp.org/es/GWP-Sud-America/ACERCA/por-que/PRINCIPALES-DESAFIOS/Que-es-la-GIRH/>
- Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2001). *Plan de desarrollo urbano del estado de San Luis Potosí, 2001- 2020*. San Luis Potosí, S.L.P.
- Goodchild, M. y Haining, R. (2005). *SIG y análisis espacial de datos: perspectivas convergentes*. *Investigaciones Regionales*, 175-201 p.
- Guevara, V. (2008). *Distribución espacial y abastecimiento del agua para uso humano, en el área metropolitana de la ciudad de San Luis Potosí: problemática, implicaciones y alternativas*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P.
- H. Ayuntamiento de San Luis Potosí. (2003). *Plan de centro de población estratégico San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez*. San Luis Potosí, S.L.P.
- Hernández, J. (2008). *Identificación de la recarga natural e inducida en la cuenca de San Luis Potosí*. (Tesis Doctoral). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Hernández, Y. (2015). *Agua y abastecimiento: gestión de cuerpos de agua en la ciudad de San Luis Potosí (México), 1831-1887*. *Revista de historia regional y local*, 7(14), 60-98 p.

- Huang, Y., Jiang, D., Zhuang, D., Zhu, Y. y Fu, J. (2013). *An improved approach for modeling spatial distribution of water use profit-A case study in Tuhai Majia, China*. *Ecological Indicators*, 36, 94-99 p.
- Hurtado, V. (2016). *Estudio de la contaminación ambiental de la ciudad de México mediante los modelos de redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos*. (Tesis de Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional. Cd. de México.
- INEGI. (2008). *Estudio hidrológico del estado de San Luis Potosí*. Aguascalientes, Ags.
- INEGI. (2010). *Agua Potable y Drenaje*. Recuperado de: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- INEGI. (2015). *Población*. Recuperado de [http://www.cuentame.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/div\\_municipal.aspx?tema=me&e=24](http://www.cuentame.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=24)
- INEGI. (2018). *Flora y Fauna*. Recuperado de [http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/recursos\\_naturales.aspx?tema=me&e=24](http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/recursos_naturales.aspx?tema=me&e=24)
- INEGI. (2018). *Imágenes de Satélite LANDSAT*. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.aspx>
- INEGI. (2018). *SIATL*. Recuperado de [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#)
- INEGI. *Aspectos técnicos de las imágenes Landsat*. Recuperado de [http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos\\_tecnicos\\_imagenes\\_landsat.pdf](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_imagenes_landsat.pdf)
- INTERAPAS. (2013). *Gestión del agua en la zona metropolitana de San Luis Potosí, Cerro de san Pedro y Soledad de Graciano Sánchez*. San Luis Potosí, S.L.P. Recuperado de: [http://www.interapas.mx/files/gestion\\_agua/GESTION\\_DEL\\_AGUA\\_2013.pdf](http://www.interapas.mx/files/gestion_agua/GESTION_DEL_AGUA_2013.pdf)
- Jiang, H., y Eastman, J. R. (2000). *Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS*. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173-184.
- Lima, M., Escobar, J., Massone, H., y Martínez, D. (2012). *Modelación geoespacial exploratoria en cuencas de llanura: caso de aplicación en la cuenca del Arroyo Dulce, Buenos Aires, Argentina*. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 51-65 p.

- Linsley, R., Kohler, M., y Paulus, J. (1977). *Hidrología para ingeniero*. Segunda edición. Capítulo 8: Relaciones entre precipitación y escurrimiento, inciso 1: Retención Superficial. 211-213 p. Editorial McGraw Hill latinoamericana, S.A. Bogotá, Colombia.
- Longley, P., y Batty, M. (2003). *Advanced spatial analysis: the CASA book of GIS*. ESRI, Inc..
- López, B., Ramos, J., Moran, J., Cardona, A., y Hernández, G. (2013). *Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el valle de San Luis Potosí*. Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, 65(1), 9-26 p.
- Lorreyns, L. (2018). *Estudio descriptivo y comparativo: principios rectores de la gestión integral de recursos hídricos*. Boletín Semillas Ambientales, 12(1), 142 p. Bogotá, Colombia.
- Lull, H. (1964). *Ecological and Sivicultural Aspects*. Section 6 in the handbook of applied hidrology, editor-in-chief-Ven-te-Chow, theme IV: Interception, page 6-6 to 6-13. McGraw Hill Book Company. New York, U.S.A.
- Maidment, D. R., y Morehouse, S. (2002). *Arc Hydro: GIS for water resources* (Vol. 1). ESRI, Inc.
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley y Sons.
- Mamade, A., Loureiro, D., Covas, D., Coelho, S. T., y Amado, C. (2013). *Spatial and temporal forecasting of water consumption at the DMA level using extensive measurements*. In 2nd International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI, 2-5 p.
- Markham, B. L., Dabney, P. W., Murphy-Morris, J. E., Pedelty, J. A., Knight, E. J., Kvaran, G., & Barsi, J. A. (2010, July). *The Landsat data continuity mission operational land imager (OLI) radiometric calibration*. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2010 IEEE International (pp. 2283-2286). IEEE.
- Markstrom, S., Regan, R., Hay, L., Viger, R., Webb, R., Payn, R., y Lanfontaine J. (2015). *PRMS-IV-the precipitation- Runoff Modeling System, Version 4*. Geological Survey Techniques and Methods, Book 6, Capítulo B7, 158 p.
- Martínez, V. (1984). *Control geológico estructural del agua subterránea entre San Luis Potosí, Aguascalientes y Zacatecas*. Folleto Técnico 105, 25 p. Instituto de geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Martínez, V. (1997). *Actualización del marco geológico del subsuelo del valle de San Luis Potosí*. Folleto Técnico 105, 25 p. Instituto de geología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Maune, D. (2001). *Digital elevation model technologies and applications: the DEM user's manual*. 207-236 p.
- McFeeters, S. (1996). *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. Int. J. Remote Sens. 17, 1425–143 p.
- Mena, F. (2006). Modelación espacial mediante geomática y evaluación multicriterio para la ordenación territorial. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad Tarapacá*. 4 (1), 81-89 p.
- Mena, N. (2009). Modelo unificado para la gestión de información en una infraestructura nacional de datos espaciales. *Acimed*, 19(3).
- Méndez, K. (2017). *Estimación del uso y aprovechamiento del agua en el estado de San Luis Potosí a través de un modelo de distribución espacial*. (Tesis de Maestría). Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P.
- Miranda, M., y Condal, R. (2003). *Importancia del análisis estadístico exploratorio en el proceso de interpolación espacial: caso de estudio Reserva Forestal Valdivia*. *Bosque (Valdivia)*, 24(2), 29-42.
- Mota, O. I. (2018). *Análisis espacial multicriterio enfocado a la gestión de proyectos de agua potable en el municipio de Huimanguillo, Tabasco*. *Kuxulkab'*, 23(46).
- Noyola, M., Ramos, J., Domínguez, E., Pineda, I., López, H., y Carbajal, N. (2009). *Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso valle de San Luis Potosí*. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 26 (2), 395-410 p.
- Ocampo, D., Rivas, R. (2011). *Evaluación de métodos de estimación de la evapotranspiración a escala mensual y anual en Argentina: aplicación en zonas húmedas, semiáridas y áridas*. Cuadernos del Curiham.
- Pachri, H., Mitani, Y., Ikemi, H., Djamaluddin, I., y Morita, A. (2013). *Development of Water Management Modeling by Using GIS in Chirchik River Basin, Uzbekistan*. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, 169-176 p.

- Panagopoulos, G. P., Bathrellos, G. D., Skilodimou, H. D., y Martsouka, F. A. (2012). *Mapping urban water demands using multi-criteria analysis and GIS*. *Water resources management*, 26(5), 1347-1363 p.
- Pérez, A. y Mas, J. (2009), “*Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación*”. *Investigaciones Geográficas*, 69, 53-67 p.
- QGIS Project. (2018). *QGIS User Guide*. Recuperado de <https://www.qgis.org/es/site/forusers/trainingmaterial/index.html>
- Quintero, J. (Ed.). (2009). *Definición y origen de los Sistemas de Información geográfica*. UNAM, Instituto de Geografía. Cd. de México, México.
- Rao, D. (2005). *Multi-criteria spatial decision analysis for forecasting urban water requirements: a case study of Dehradun city, India*. *Landscape and Urban Planning*, 71(2-4), 163-174 p.
- SAGARPA. (2016). *El poder de la información geoespacial*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/sagarpa/articulos/el-poder-de-la-informacion-geoespacial>
- Sánchez, K., Piedra, M. A., y Galloway, G. (2004). *Metodología de análisis multicriterio para la identificación de áreas prioritarias de manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Sarapiquí, Costa Rica*.
- Sánchez, M. (2001). *Métodos de estimación de evapotranspiración utilizados en Chile*. *Geografía Grande*, 28, 3-10 p.
- Senet, A., Perez, J., Padilla, J., Raghavan, D. (2018). *Introduction y advanced Swat Workshops*. Servicio Meteorológico Nacional (2018). *El Niño Oscilación del Sur (ENOS)*. Recuperado de: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/diagnostico-climatico/enos>.
- Servín, C., Mendoza, G. (2008). *Abasto futuro del agua potable análisis espacial y vulnerabilidad de la ciudad de San Luis Potosí, México*. *Cuadernos de Geografía*, vol.17, 127-137 p.
- SIAP. (2016). *Información geoespacial*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap/informacion-geoespacial/>

Sibson, R. (1981). *Brief description of natural Neighbor interpolation*. Interpolating Multivariate data. 21-36. Nueva York.

Stretta, E., y Del Arenal, R. (1961). *Carta Geohidrológica provisional de la cuenca de San Luis Potosí, S.L.P., México*. Instituto de ciencia aplicada, sección de hidrología y misión de geohidrología de la UNESCO. Instituto de geología de la UNAM.

UNESCO. (2016). *El agua dulce*. Recuperado de: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/Water>

Universidad de Murcia. (2003). *Clasificación*. Recuperado de: <http://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema09.pdf>.

USGS. (2018). *Manual de usuarios de datos Landsat 8. Sección 1*. Recuperado de <https://landsat.usgs.gov/landsat-8-18-data-users-handbook-section-1>

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2016). *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo*. París, UNESCO.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). *Facing the Challenges. Case Studies and Indicators*. París, UNESCO.

Yadav, S. M., Singh, N. P., Shah, K. A., y Gamit, J. H. (2014). *Performance evaluation of water supply services in developing country: A case study of Ahmedabad city*. KSCE Journal of Civil Engineering, 18(7), 1984-1990 p.