



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CALIDAD DEL AGUA Y EL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA SUBCUENCA DE
SAN MARTÍN TEXMELUCAN.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA:

RICARDO ARTURO SORIA CHAVERO

DIRECTORA DE TESIS: M. en C. Eloisa Adriana Guerra Hernández

ASESOR: M. en C. Faustino López Barrera

Septiembre 2016, Ciudad de México

APOYO DGAPA
PROYECTO PAPIME PE206413





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

“Vivimos en una sociedad profundamente dependiente de la ciencia y la tecnología y en la que nadie sabe nada de estos temas. Ello constituye una fórmula segura para el desastre”.

Carl Sagan.

“¡Qué hermosas montañas las de México! Aquellos conos de nieve perpetua es lo más hermoso del mundo; esas cabezas de nieve majestuosa que se elevan en medio de la brillante vegetación de los trópicos”

Alejandro de Humboldt.

“La ciencia es el alma de la prosperidad de las naciones y la fuente de vida de todo progreso”

Louis Pasteur.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por la formación profesional que se me brindó a lo largo de todo de toda mi permanencia en la carrera de Biología.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo financiero otorgado durante los semestres cursados de la carrera de Biología, mil gracias.

A la Dirección General de Asuntos de Personal Académico y al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza, al proyecto “Elementos didácticos y uso de las TIC’s en el estudio de ecosistemas ribereños de montaña” (PE206413) y a su responsable M. en C. Eloisa Adriana Guerra Hernández por el apoyo financiero otorgado para la culminación del presente trabajo.

Al laboratorio de Calidad del agua y Ecohidrología así como al laboratorio de Edafología y Nutrición Vegetal, por el apoyo y las herramientas brindadas para el desarrollo y conclusión de este estudio.

A todos los que fueron mis profesores en la carrera, siempre aprendí algo de todos ustedes, por el tiempo y esfuerzo, los admiro.

Al M. en C. Ramiro Ríos Gómez por todas las observaciones que contribuyeron a optimizar este trabajo, así como por el tiempo brindado para ello, muchas gracias.

Al M. en C. Faustino López Barrera, por la confianza y el tiempo brindados, por facilitarme el acceso a su espacio de laboratorio, los consejos, las salidas de campo, el internet, libros, por ser quien me enseñó sobre vegetación, muchas gracias por el apoyo profesor.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, por el apoyo, las observaciones, los comentarios y todas las enseñanzas, por ser parte de esta etapa de mi formación, por siempre tener una excelente actitud así como amenizar las prácticas de campo, gracias.

A la Biol. Beatriz Martínez Rosales, por sus comentarios para el mejoramiento de esta tesis.

Mi eterno agradecimiento con afecto y admiración a mi profesora y directora de tesis M. en C. Eloisa Adriana Guerra Hernández, por brindarme una oportunidad en su laboratorio, por su tiempo, consejos, llamadas de atención, las enseñanzas y palabras de aliento, agradezco su confianza y apoyo, por permitirme ser parte de este proyecto y ayudarme a concluir el ciclo más importante durante mi formación académica, por todo, infinitas gracias.

A mis compañeros y amigos de laboratorio Ceci, Eri, Jess, Mau y Chava, por todas horas de trabajo, por todo su apoyo, por ser siempre un equipo de trabajo, sin cualquiera de ustedes nada de esto hubiese sido posible. También a mis compañeros de edafología Christian, Gen, Laurita, Pao y Xo.

DEDICATORIA

A mis padres, Leonor y Armando por haber confiado en mí, por su apoyo incondicional, porque gracias a ustedes tuve la oportunidad de estudiar una carrera, pero sobre todo por su cariño y amor, esta tesis es gracias a ustedes.

A mis hermanas Karina y Maribel por todo el ánimo que me han brindado a lo largo de mi proceso académico (y a Beto por siempre tener una sonrisa para todos).

A los 3 pilares de mi formación como biólogo, maestra Eloísa, profesor Faus y doc. Gerardo, gracias por guiar mi camino como biólogo, por todas las enseñanzas tanto académicas como personales, infinitas gracias.

A mi mejor amiga y compañera a lo largo de la universidad, Ceci, gracias por todo tu apoyo amor.

A mis compañeros y amigos por las experiencias acumuladas a lo largo de la carrera y por todas las risas gracias Aldo, Anita, Arantxa, Axel, Chachis, Chava, Chirstian, Diego, Eri, Franco, Jess Zulema, Jessi, Kharen, Laurita, Maguito, Mara, Marianita, Mauricio, Oscar, Peques, Richi Gen, Richi Panda y Wendy.

ÍNDICE.

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE CUADROS	7
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN.....	10
ANTECEDENTES.....	11
MARCO TEÓRICO	12
Ecosistemas naturales a través del tiempo.....	12
Efecto de los cambios de uso de suelo en las cuencas.....	13
Los ecosistemas forestales y sus servicios hidrológicos	14
Ecosistemas ribereños	15
El agua	16
El agua en México	17
La calidad del agua	19
Conductividad eléctrica	20
Nitrógeno y sus diferentes formas químicas	21
Fósforo orgánico e inorgánico	22
Materia orgánica y sus demandas de oxígeno.....	23
ZONA DE ESTUDIO	24
JUSTIFICACIÓN	27
HIPÓTESIS.....	27
OBJETIVOS.....	28
General.....	28
Específicos.....	28
MÉTODO	29
Trabajo de gabinete (primera fase)	29
Trabajo de campo	29
Trabajo de gabinete (segunda fase).....	31
Trabajo estadístico.....	34
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
CONCLUSIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Las 10 naciones con mayor crecimiento anual en área de bosques cultivados de 1990 al 2010.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2. Disponibilidad de agua y especies de peces y anfibios de México en comparación internacional.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3. Localización de la subcuenca en los estados de Tlaxcala y Puebla.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4. Municipios de la subcuenca de San Martín Texmelucan y zonificación del Parque Nacional Izta-Popo.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 11. Uso del programa ArcGis 10.3 para la elaboración de los mapas de usos del suelo.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12. Diagrama de procesos de cambio para los usos del suelo (Soria, 2016).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 13. Utilización del programa Statgraphics Centurion XVI para el análisis estadístico.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14. Mapa del relieve en la subcuenca, sitios de muestreo y los ríos secos.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993).....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999).....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 17. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 18. Mapa de cambios en los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-1999).</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19. Mapa de cambios en los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999-2010).</i>	<i>42</i>
<i>Figura 20. Mapa de cambios en los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-2010).</i>	<i>43</i>
<i>Figura 21. Ejemplo del uso de suelo agrícola.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22. Áreas agrícolas en la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23. Cuerpo de agua en la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).</i>	<i>45</i>
<i>Figura 24. Cuerpo de agua introducido en una zona forestal.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 25. Ortofotografía del 2010 donde se aprecian bosques de la subcuenca de San Martín Texmelucan.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 26. Uso del suelo de tipo forestal.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 27. Actividades pecuarias en las zonas de pastizal inducido.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28. Polígono de pastizal inducido producido por el abandono de tierras agrícolas.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 29. Pastizal montano a 4100 m s. n. m.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 30. Ortofotografía donde se aprecian el pastizal montano (tonalidades marrones claras) y las áreas sin vegetación aparente (tonalidades grisáceas).</i>	<i>50</i>
<i>Figura 31. Zona sin vegetación aparente donde se aprecia la roca desnuda.</i>	<i>50</i>
<i>Figura 32. Asentamientos humanos.</i>	<i>51</i>
<i>Figura 33. Asentamientos humanos rodeados por zonas de cultivo en una ortofotografía (2010).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 34. Uso del suelo denominada como vegetación secundaria de bosque de pino.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 35. Zona de vegetación secundaria de bosque de pino rodeada por un bosque primario.</i>	<i>52</i>
<i>Figuras 36 y 37. Degradación de los bosques por actividades pecuarias y de tala.....</i>	<i>54</i>
<i>Figuras 38 y 39. Actividades antrópicas y secuelas de estas a más de 4,000 m n. s. m. en el pastizal montano.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 40. Gráfico de porcentajes para los usos del suelo del año 1993.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 41. Gráfico de porcentajes para los usos del suelo del año 1999.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 42. Gráfico de porcentajes para los usos del suelo del año 2010.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 43. Tasas de Cambio en los usos del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan para el periodo 1993-2010.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 44. Tasas de Cambio en los usos del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan para el periodo 1993-1999.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 45. Tasas de Cambio en los usos del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan para el periodo 1999-2010.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 46. Gráfico donde se aprecian las áreas de los diversos procesos de cambio en la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-2010).</i>	<i>60</i>
<i>Figura 47. Gráfico donde se aprecian las áreas de los diversos procesos de cambio en la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-1999).</i>	<i>60</i>

<i>Figura 48. Gráfico donde se aprecian las áreas de los diversos procesos de cambio en la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999-2010).</i>	61
<i>Figura 49. Sitio 21 (seco 1).</i>	62
<i>Figura 50. Sitio 22 (seco 2).</i>	62
<i>Figura 51. Sitio 23 (seco 3).</i>	63
<i>Figura 52. Sitio 24 (seco 4).</i>	63
<i>Figura 53. Sitio 25 (seco 5).</i>	63
<i>Figura 54. Zonas próximas al Sitio 25 (seco 5).</i>	63
<i>Figura 55. Sitio 26 (seco 6).</i>	64
<i>Figura 56. Sitio 12.</i>	64
<i>Figura 57. Sitio 6 Palo Obispo Río</i>	64
<i>Figura 58. Sitio 27 (seco en temporada de estiaje).</i>	64
<i>Figura 59. Pinus ayacahuite y Abies religiosa talados en el sitio 27.</i>	65
<i>Figura 60. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitratos en la subcuenca baja y alta.</i>	67
<i>Figura 61. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitritos en la subcuenca baja y alta.</i>	67
<i>Figura 62. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de amonio en la subcuenca baja y alta.</i>	67
<i>Figuras 63 y 64. Sitios con mayor concentración de nitratos que se encuentran en la subcuenca baja.</i>	68
<i>Figura 66. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de ortofosfatos en la subcuenca baja y alta.</i>	69
<i>Figura 67. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DBO₅ en la subcuenca baja y alta.</i>	70
<i>Figura 68. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DQO en la subcuenca baja y alta.</i>	70
<i>Figura 69. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de CE en la subcuenca baja y alta.</i>	71
<i>Figura 70. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DBO₅ en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	72
<i>Figura 71. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DQO en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	72
<i>Figura 72. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de CE en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	73
<i>Figura 73. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de fósforo total en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	74
<i>Figura 74. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de ortofosfatos en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	74
<i>Figuras 75 y 76. Sistemas lóticos en pastizal montano y bosque.</i>	75
<i>Figura 77. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitratos en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	75
<i>Figura 78. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitritos en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	76
<i>Figura 79. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de amonio en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	77

ÍNDICE DE CUADROS

<i>Cuadro 1: Naciones con mayor pérdida de área forestal neta de 1990 al 2010.</i>	<i>13</i>
<i>Cuadro 2. Tipos de ortofotos y sus características para la realización de los mapas de coberturas del suelo.</i>	<i>32</i>
<i>Cuadro 3. Localización de los sitios afectados en la temporalidad del caudal.</i>	<i>36</i>
<i>Cuadro 4. Localización de los sitios de muestreo y sitios afectados en temporalidad y caudal.</i>	<i>37</i>
<i>Cuadro 5: Tipo de Usos del suelo y áreas en la subcuenca de San Martín Texmelucan.</i>	<i>53</i>
<i>Cuadro 6. Áreas de los diversos usos del suelo en 3 épocas y prospecciones para los años 2020 y 2040.</i>	<i>59</i>
<i>Cuadro 7. Población y detalles de viviendas pertenecientes a las áreas de escurrimiento afectadas de sistemas ribereños actualmente secos (el punto 22 y 23 se encuentran corriente arriba con respecto al punto 24 por lo que no se toman en cuenta para la suma total).</i>	<i>62</i>

RESUMEN

Desde el inicio de la humanidad el agua ha sido un recurso valioso e indispensable para el avance de la civilización, los asentamientos humanos se desarrollan cerca de los ecosistemas de agua dulce. Esos cuerpos de agua que pueden ser ríos, arroyos, lagos o manantiales son impactados por la presencia y actividad humana. La disponibilidad de agua así como su calidad disminuye por el aporte de desechos humanos, sedimentación y materia orgánica debido a las actividades aledañas a los cuerpos lóticos y lénticos.

La vegetación colindante a los ríos es conocida como ribereña, dichos ambientes ribereños representan una zona de transición entre el ecosistema acuático y el terrestre. Los ecosistemas ribereños son abundantes en biodiversidad gracias a las condiciones de sus microclimas. Estos ecosistemas actúan como una franja de amortiguamiento frente a los contaminantes que pueden llegar al sistema lótico, la pérdida de la vegetación ribereña conlleva la potencial contaminación del agua disminuyendo su calidad.

En este trabajo se evaluó la calidad del agua de los sistemas lóticos y los cambios en los usos de suelo en la subcuenca de San Martín Texmelucan, ubicada en parte de los estados de Puebla y Tlaxcala, incluyendo una fracción del PNIP. Se midieron 8 parámetros físicos y químicos del agua (DQO, DBO₅, nitritos, nitratos, amonio, fósforo total, ortofosfatos y conductividad eléctrica) en las corrientes de la subcuenca San Martín Texmelucan iniciando en junio del 2013 y terminando en noviembre de 2014. Los mapas fueron realizados con ArcGis 10.3 para los usos de suelo en 3 temporadas (1993, 1999, 2010) y también los cambios entre las fechas mediante ortofotografías digitales, verificaciones y muestreos en campo. Los resultados muestran que la subcuenca ostenta con un alto nivel de antropización en la parte baja y con la conservación de los ecosistemas forestales en la parte alta debido a la delimitación del PNIP en donde se benefician los sistemas lóticos de la zona preservando la calidad del agua y regenerando el ciclo hidrológico. El amonio, los nitritos y la DQO fueron las variables más significativas de la calidad del agua para la subcuenca San Martín Texmelucan. El uso de suelo urbano presenta una diferencia significativa con respecto a los otros usos de suelo en la calidad del agua, ocasionado por las zonas pobladas de la cuenca que ejercen una mayor presión sobre el agua, ya que aportan descargas municipales y flujo de nutrimentos. Los procesos de deforestación y urbanización son causantes de la pérdida de corrientes superficiales, aunado a obras de infraestructura realizadas por pobladores y gobierno estatal. La tasa de cambio para el uso urbano es la más alta en ganancias de territorio, mientras que en pérdidas son la vegetación secundaria de bosque de pino y los cuerpos de agua. Las prospecciones futuras apuntan a que los cuerpos de agua y vegetación secundaria se verán disminuidos ampliamente en futuros años mientras que el uso urbano según la prospección podría pasar a más del triple de su extensión de 1993 a 2040.

ABSTRACT.

Since the beginning of mankind the water has been a valuable and indispensable resource to the civilization advancement, the human settlements develop near the fresh water environments. These fresh water systems can be rivers, streams, lakes or springs are impacted by the presence and human activity. Water availability and quality is reduced by the presence of human waste, silting and organic matter from anthropogenic activities taking place in surrounding areas. Riparian environments represent a transition zone between the aquatic and terrestrial ecosystems are abundant in biodiversity, due to conditions microclimate and buffer function against the incorporation of pollutants into lotic system. The vegetation adjacent to these systems is known as riparian vegetation and ecosystem loss quality and leads generate its degradation.

In this study the water quality of the lotic systems and changes in land uses was evaluated in the subwatershed of San Martin Texmelucan, it include a fraction of National Park Iztaccíhuatl-Popocatepetl (NPIP) and located in Puebla and Tlaxcala states. The physical and chemical water evaluation included eight parameters (COD, BOD₅, nitrites, nitrates, ammonium, total phosphorus, orthophosphate and electrical conductivity) were measured in the streams of San Martin Texmelucan subwatershed. This project started in June 2013 and ending in November 2014. The maps were created with ArcGis 10.3 for land use in 3 seasons (1993, 1999, 2010). For land use changes between dates were using digital orthophotos, checking and sampling in field. The results show that the subwatershed boasts a high level of human impact on the low basin and the conservation of forest ecosystems on the high mountain due to the delimitation of NPIP where the riparian systems benefit preserving quality water and regenerating the hydrological cycle. Ammonia, nitrites and COD were the most significant variables of water quality for San Martin Texmelucan sub-basin. The urban land use presents a significant difference with respect other land uses on water quality, caused by the populated areas of the basin, it caused greater pressure on water because they provide municipal discharges and nutrient flow. The processes of deforestation and urbanization, coupled with construction works carried out by settlers and state government, are causing the loss of surface currents. The exchange rate for urban use is the highest in territory gains, while losses are secondary vegetation of pine forest and water bodies. Future perspectives indicate that water bodies and secondary vegetation will be largely reduced in future years while urban use according to the survey could move on to more than triple its extension from 1993 to 2040.

INTRODUCCIÓN

La accidentada topografía de nuestro país y su ubicación favorecen el desarrollo de una gran variedad de cuerpos de agua dentro de su territorio, así como una flora y fauna diversificadas y ricas en especies nativas que sólo ahí existen (endémicas), además de ahí la importancia acerca del estudio de los cuerpos de agua en el país y sus servicios hidrológicos como la calidad del agua. En cuanto a la alteración de los ecosistemas ribereños un factor importante de conversión que se ha incrementado en las últimas décadas es el desarrollo de las zonas urbanas. Se calcula (INEGI, 2005) que el área cubierta por este uso del suelo llegó a 1.11 millones de hectáreas en 1993, y a 1.26 millones en 2002. Sin embargo, estas estadísticas no reflejan el hecho de que los asentamientos urbanos tienen un impacto extendido con manifestaciones diversas, que van más allá de lo que se insinúa por el área cubierta por las ciudades.

La superficie forestal proporciona la primera indicación de la importancia relativa de los bosques en un país o región, por lo tanto, las estimaciones de la variación de la superficie forestal a través del tiempo indican la demanda de tierras para la silvicultura y otros usos. La superficie forestal es relativamente fácil de medir y ha sido seleccionada como uno de los 60 indicadores para monitorear el progreso con miras al cumplimiento de los objetivos del desarrollo del milenio (garantizar la sostenibilidad del medio ambiente), la meta de biodiversidad 2010 y los objetivos mundiales sobre los bosques. Los datos sobre el estado y las tendencias de la superficie forestal son cruciales para las decisiones sobre las políticas forestales, de uso del suelo y la asignación de recursos, pero tienen que ser contrastados con información sobre otros aspectos como la salud, vitalidad del bosque, aspectos socioeconómicos, servicios ambientales y valor de los bosques (FAO, 2010). Entre los servicios ambientales relacionados con la hidrología se encuentran la captación, absorción, purificación e infiltración de agua, las cuales se ven afectadas mediante el cambio de las coberturas naturales del suelo, principalmente cuando son sustituidas por usos de suelo antrópicos como asentamientos humanos, industrias, práctica de agricultura, así como la ganadería extensiva. Estos ecosistemas son muy dinámicos y presentan variabilidad en sentido espacial y temporal. Los cambios temporales se han medido con precisión durante muchas décadas y sus consecuencias para la calidad del agua han sido reportadas, pero ahora cada vez es más evidente que el patrón de movimiento del agua en los ríos puede ser muy variable (Harper y Ferguson, 1997).

Debido a que los cambios en los patrones de la cobertura del suelo en una cuenca son muy comunes por el crecimiento poblacional, la calidad del agua se considera sensible a estos (Xia et al. 2012). A nivel físico y químico se tienen alteraciones importantes por cambios de uso de suelo, factor que influye en la vulnerabilidad del recurso, así mismo cuando disminuye la franja ribereña de las microcuencas y se incrementa el área de pasturas-ganadería y por ende el acceso de los animales al cauce, también aumenta el aporte de material contaminante (Auquilla et al., 2005). Por lo tanto es necesario realizar estudios a nivel de cuencas acerca de los recursos naturales y con mayor razón cuando la información con la que se cuenta tiene poca confiabilidad debido a su fecha de elaboración en la subcuenca de San Martín Texmelucan.

ANTECEDENTES

Debido al manejo que se les ha dado a los recursos naturales es necesario disponer de inventarios detallados y actualizados sobre los recursos para apoyar su planificación y gestión sostenible. Como consecuencia el análisis espacial de los patrones del ordenamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) se ha incrementado notablemente en la última década; sin embargo, en América Latina los estudios de SIG que describen la dinámica de cambios en la cobertura vegetal aún son limitados (Ochoa-Gaona y González-Espinosa, 2000).

En cuanto al uso de suelo existe cartografía elaborada por el INEGI desde 1984, para la subcuenca de San Martín Texmelucan se encuentra en una escala (1:250,000) y su confiabilidad actualment6e es baja, debido a que fue obtenida hace más de 30 años y durante estas 3 décadas se han registrado gran cantidad de cambios debido al crecimiento demográfico, las actividades antrópicas y la sobreexplotación de los recursos naturales. También existe información de la parte alta de la subcuenca, en la zona del Parque Nacional Izta Popo realizado por la CONANP (2013), sin embargo solo es una porción de la subcuenca y se encuentra representada en una escala (1:160,000).

En cuanto trabajos realizados en el área de estudio de esta tesis Vázquez (2012), tomó como objeto el sistema acuático subterráneo, con ayuda de SAGA GIS se calculó la evapotranspiración, infiltración y escorrentía los cuáles se usaron junto con datos de uso y tipo de suelo para simular el flujo subterráneo del acuífero, proponer un modelo que describió las condiciones actuales del acuífero y su perspectiva a futuro; así como la investigación hecha por Galicia (2013) que también toma como referencia las aguas subterráneas de la subcuenca donde usó la construcción de SIG para el análisis de la evolución del sistema hídrico y el territorio tomando en cuenta las transformaciones de los usos del suelo y agua en la subcuenca.

En cuestiones de cambio en el uso de suelo y cobertura vegetal Galicia & García-Romero en 2007, realizaron un estudio de cambio de uso de suelo en el PNIP con periodo de análisis de 1970 al 2000, en donde la cubierta forestal se redujo a una tasa promedio de 0,35 hectáreas por año debido a la extracción de madera, la práctica de la agricultura, el pastoreo y la urbanización; los cultivos ocasionaron una pérdida en la biodiversidad de las comunidades vegetales en las tierras bajas ocasionando una disminución de la biodiversidad regional, sin embargo, el cultivo se redujo por la desvalorización de la importancia económica de maíz y frijol. Por el contrario, el pastoreo aumentó gracias a los bajos costos laborales y las políticas económicas que proporcionaron incentivos para la producción de ganado en México mientras que el abandono de las tierras cultivadas por causas económicas tiene repercusiones en la regeneración de las comunidades vegetales en los bosques templados.

Es reconocido que los usos del suelo (urbano, industrial y/o agrícola) realizados por el hombre tienen efectos sobre los componentes bióticos y abióticos de los sistemas acuáticos, así mismo la calidad del agua se puede ver afectada tanto por descargas puntuales y no puntuales de contaminantes como nutrimentos, metales pesados y productos fitosanitarios provenientes de las actividades urbano-industriales y agrícolas (Teixeira, 2007), resultados similares reportaron Auquilla et al. (2005), donde la calidad físico-química del agua tuvo alteraciones por el cambio en el uso del suelo ya que a medida

que disminuye la franja ribereña de las microcuencas y se incrementa el área de pasturas-ganadería, con el consecuente acceso de los animales al cauce, también aumenta el aporte de materia contaminante. Como parte de la clasificación de cuerpos de Aguas Nacionales por parte de la SEMARNAT y la CONAGUA, los cuerpos de agua denominados río Atoyac y río Xochiac o Hueyapan en el estado de Puebla, se evalúan múltiples parámetros de los sistemas lóticos, sin embargo en estos estudios no se sigue un enfoque de cuencas, lo cual se ha visto que es indispensable para lograr un manejo adecuado de este bien (CONAGUA, 2011).

Para la zona de estudio de esta tesis, De anda & Miranda en 2004 encontraron que a pesar de que existen influencias antropogénicas en las zonas aledañas del Parque Izta-Popo, los parámetros analizados para la calidad del agua, cumplen con los intervalos establecidos en la NOM-001-ECOL-1996, sin embargo se registraron excepciones, en donde se requiere tratamiento antes del vertimiento a los cauces, principalmente de las zonas bajas, mientras que en los sistemas que se encuentran dentro del Parque Nacional existe una calidad de agua aceptable y en las zonas cercanas esta se ve deteriorada por las actividades agrícolas que se realizan en los alrededores para los sistemas lóticos en el Parque Nacional Izta-Popo y su zona de influencia, los cuales forman parte de las subcuencas Nexapa, Cuautla (cuenca del Balsas), Amecameca, De la Compañía (ambas en la cuenca de México) y Atoyac.

MARCO TEÓRICO

Ecosistemas naturales a través del tiempo

Los ecosistemas naturales de México han sido utilizados por el hombre durante milenios; pero el grado de impacto más notable ha tenido lugar en los últimos 50 a 100 años. Este periodo en particular se caracteriza por una tasa muy alta de cambio en la cobertura de la vegetación y el uso del suelo (CONABIO, 2008). A pesar del inadecuado manejo que se le ha dado a los bosques en México, se encuentra en el sexto lugar mundial (FAO, 2010) en cuanto al incremento de área forestal (Figura 1).

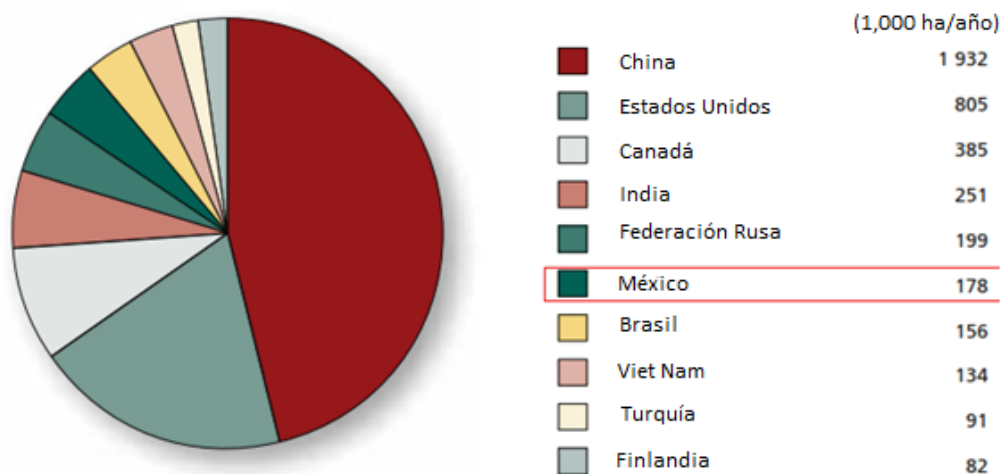


Figura 1. Las 10 naciones con mayor crecimiento anual en área de bosques cultivados de 1990 al 2010.

En Norte y Centroamérica en su conjunto, se estimó en casi lo mismo la superficie forestal para el año 2010 y en el 2000. Mientras que la superficie forestal continúa disminuyendo en todos los países de Centroamérica, salvo Costa Rica, está aumentando en América del Norte, donde la pérdida neta en México (Cuadro 1) se ve compensado por una ganancia neta en los Estados Unidos de América. El Caribe reporta un aumento de la superficie forestal debido a la forestación en Cuba y a la expansión de bosques en tierras agrícolas abandonadas de algunas islas (FAO, 2010).

Cuadro 1: Naciones con mayor pérdida de área forestal neta de 1990 al 2010.

Nación	Cambio anual	Nación	Cambio anual
	1990-2000		2000-2010
	1,000 ha/año		1,000 ha/año
Brasil	-2890	Brasil	-2642
Indonesia	-1914	Australia	-562
Sudán	-589	Indonesia	-498
Myanmar	-435	Nigeria	-410
Nigeria	-410	República Unida de Tanzania	-403
República Unida de Tanzania	-403	Zimbabue	-327
México	-354	República Democrática del Congo	-311
Zimbabue	-327	Myanmar	-310
República Democrática del Congo	-311	Bolivia	-290
Argentina	-293	Venezuela	-288

En cuanto a la zona de alta montaña del Iztaccíhuatl las comunidades vegetales son de tipo herbáceo, arbóreas y del tipo arbustivo. Todas presentan signos de disturbio en diferentes escalas e intensidades, siendo el pastoreo, la quema y tala las principales causas de perturbación de la vegetación natural. La presencia de especies favorecidas por estos impactos es la principal fuente de alteración de las comunidades vegetales de alta montaña. La alteración de la estructura vegetal ocurre por eliminación o adición de estratos y la modificación de la composición florística por la presencia de especies que se benefician por el fuego (arvenses y ruderales), esto provoca la transformación de comunidades nativas a pastizales inducidos (Neyra, 2012).

Efecto de los cambios de uso de suelo en las cuencas.

El uso del suelo es usualmente confundido en diversas clasificaciones y leyendas con la cobertura del suelo. Este uso se caracteriza por los arreglos y actividades que realizan las personas en un determinado tipo de cobertura terrestre para producir, transformarla o mantenerla. Por lo que el uso del suelo establece un vínculo directo entre la cubierta vegetal y las acciones de las personas de su entorno; sin embargo, en la práctica, la comunidad científica por lo general incluye estas características dentro de los términos de la cobertura del suelo (FAO, 2005). Las cuencas pueden caracterizarse a través de ciertos parámetros descriptivos (Wanielista, et al. 1997). Estos parámetros definirán la forma y magnitud de cualquier cuenca. El total de la escorrentía resultante de un evento de precipitación en una cuenca hidrográfica puede estimarse utilizando un balance de masas. Por otro

lado el escurrimiento es agua proveniente de la precipitación o deshielo de las partes altas que circula de manera superficial o subsuperficial y que llega hasta la superficie terrestre para después pasar a una corriente y ser drenada hasta la salida de la cuenca (Aparicio, 1994).

Otras características de las cuencas son los tipos y uso del suelo. Después de la extracción inicial, el agua fluye sobre la tierra a un sistema natural o artificial de drenaje, la pendiente del conducto, rugosidad hidráulica, almacenamiento de canal o la longitud, área impermeable, el volumen de infiltración, y la morfología de la cuenca, afectan la forma del hidrograma de descarga de la cuenca (Wanielista et al. 1997). Las cuencas hidrográficas se consideran como sistemas complejos, abiertos y dinámicos, donde las interacciones entre las actividades antrópicas y las características inherentes del territorio dan origen a impactos y externalidades, puntuales y difusos, los cuales afectan la el estado de los ecosistemas en detrimento de los bienes y servicios ambientales, la salud humana y los patrones del clima. Estas alteraciones muchas veces dan lugar a conflictos socio-ambientales y en respuesta se generan instrumentos de política pública (Cotler, 2010).

Tomando una cuenca como unidad, la vegetación cumple con un gran número de funciones que ayudan a mantener la estabilidad y correcto funcionamiento del intercambio de materia y energía cuenca arriba-cuenca abajo (Matthews et al., 2000), la pérdida y degradación de la vegetación natural, así como la velocidad a la que están ocurriendo dichos cambios, desencadenan procesos negativos (a distintas escalas espaciales y temporales) muchas veces difíciles de revertir. Esto compromete los servicios ecosistémicos en las cuencas, como la estabilización del suelo, la regulación del volumen y periodicidad de los caudales y la purificación e infiltración del agua, por mencionar algunos (Matthews et al., 2000; Revenga et al., 1998).

La mayoría de los usos de la tierra o actividades ya sean industriales, agrícolas o urbanas tienen un impacto en la calidad del agua (Harrison, 1996). Verbigracia, la erosión hídrica, que es un proceso iniciado con el desprendimiento de partículas de la superficie del suelo por la lluvia o en el fondo de las corrientes por la fricción, las partículas son transportadas desde la parte superior a las partes bajas de la cuenca por la energía de las aguas superficiales corriendo por las pendientes o en el canal; los procesos de erosión en el área de drenaje alteran el ciclo hidrológico de tal manera que se refleja en la disminución drástica de la cantidad de agua utilizable por hombre y un aumento de las inundaciones destructivas, el aporte de sedimentos a los cursos de agua, lo que afecta el régimen de escorrentía natural (Harper y Ferguson, 1997).

Los ecosistemas forestales y sus servicios hidrológicos

Los bosques templados de coníferas y latifoliadas, en los cuales los pinos (*Pinus* spp.), oyameles (*Abies* spp.), pinabetos (*Picea* spp., *Pseudotsuga* spp.) y encinos (*Quercus* spp.) son las especies dominantes en su composición y estructura, predominan en las zonas de clima templado de las principales sierras del país. Debido a la fertilidad de sus suelos y a su clima templado han sido objeto de procesos de transformación con fines agrícolas, energéticos y por asentamientos humanos a lo largo de milenios (CONABIO, 2008).

Con la conquista española, se acentuaron algunas prácticas como el arado, que permitió cultivar terrenos antes no aptos, a ello se agregaron mayores presiones de deforestación, así como la ganadería extensiva y el crecimiento urbano, los cuales han sido los factores más importantes en la destrucción de estos bosques y de su biodiversidad (Challenger, 1998). Los bosques templados representan el ecosistema forestal de mayor cobertura en el país con una extensión original de casi 44 millones de hectáreas, extensión que se redujo drásticamente a menos de la mitad en el año 2002, dejando 22.2 millones de hectáreas en relativamente buen estado de conservación, la cuales representan 66% del total remanente (CONABIO, 2008).

Los suelos forestales desempeñan numerosas funciones protectoras, unas locales y otras mundiales, tales horizontes esencialmente orgánicos, le dan una excelente capacidad de filtración y retención de agua. La escorrentía superficial es mínima y la recarga del agua del subsuelo es más eficiente, para el beneficio de manantiales permanentes (Brüschweiler et al., 2004; FAO, 2009).

Los bosques son factor fundamental en la cantidad de agua disponible a nivel subterráneo, las corrientes y las masas de agua superficiales son modificadas por la intercepción de la lluvia, la transpiración de la humedad superficial de la vegetación, la evaporación de la humedad del suelo, la captación del agua de la bruma y el mantenimiento de la infiltración del suelo, inciden en los tiempos del suministro del agua, mediante el mantenimiento o mejoramiento de la filtración del suelo y de la capacidad de éste para almacenar agua. Al reducir la erosión al mínimo, se reducen también al mínimo los daños a la calidad del agua debidos a la sedimentación. Los bosques también pueden proteger las masas de agua y las corrientes porque atrapan los sedimentos y los contaminantes producidos por las actividades y los usos de las zonas altas. A lo largo de los ríos, los bosques ofrecen sombra y así disminuyen la temperatura del agua. La contribución más significativa de los bosques al agua para todos los seres vivos consiste en mantener la cantidad necesaria para el buen funcionamiento del ecosistema y la elevada calidad de la misma. Esto se logra reduciendo al mínimo la erosión del suelo localmente, lo que disminuye el aporte de sedimentos en las masas de agua (humedales, estanques y lagos, arroyos y ríos), y atrapando o filtrando otros contaminantes del agua. Cuando la calidad del agua es una prioridad elevada, los bosques son la mejor cubierta del suelo o uso de la tierra. Por lo que una cubierta forestal inalterada ofrece una gran protección contra la erosión, la sedimentación y los daños por otros contaminantes, considerando esto el mejor uso, se designa a los bosques con regímenes de ordenación, como las zonas núcleo de los Parques Nacionales o las reservas protegidas de las cuencas. así las pérdidas comerciales se pueden compensar con creces conforme el agua se vuelve más escasa y más valiosa (FAO, 2009).

Ecosistemas ribereños

Por definición la zona riparia o ribereña es la región de transición y de interacciones entre los medios terrestre y acuático, estas áreas ribereñas sostienen ecosistemas que son más diversos estructuralmente y más productivos en biomasa animal y vegetal que las áreas adyacentes de tierra firme, esta zona se caracteriza por una flora y una fauna de gran diversidad, cuya composición está fuertemente determinada por la intensidad luminosa, el contenido en agua y la granulometría del suelo (Granados-Sánchez et al. 2006; Rosales, 2000).

Los sistemas fluviales albergan una gran diversidad de especies de peces, crustáceos, moluscos e insectos, recursos clave en las redes alimentarias; muchos de ellos sustentan ictiofaunas exclusivas. Mantener la integridad de estas comunidades requiere un manejo cuidadoso y específico, ya que cada caso es diferente y en algunos casos es urgente protegerlas contra desecación, canalización, contaminación, deforestación, construcción de caminos, uso recreacional intensivo y otros tipos de explotación (Aguilar, 2003). Estos sistemas acuáticos desempeñan un papel fundamental desde el punto de vista ecológico y es necesario atender los muchos problemas relativos a su integridad, su sostenimiento y la supervivencia de sus especies. La biodiversidad de las aguas continentales forma parte importante del patrimonio nacional y se encuentra en la actualidad muy degradada por un manejo ineficiente y la falta de planeación (Aguilar, 2003).

En cuanto a su alteración, los ecosistemas dulceacuícolas y su biodiversidad se encuentran bajo amenaza por usos extractivos como la recolección, caza y pesca de sus especies de interés comercial (incluyendo crustáceos y avifauna), por la introducción de especies exóticas y por las obras de canalización, entubamiento, desvío y drenaje (Carabias, 2005).

El agua

El agua además de ser el principal vehículo de transporte de elementos minerales disueltos y de partículas más complejas, condiciona la velocidad y las características de procesos clave en el ciclo del carbono y del nitrógeno, ya que el porcentaje de humedad en el aire influye en la regulación de las tasas de descomposición de la materia orgánica. Este valioso líquido ingresa en los ecosistemas (acuáticos y terrestres) desde la atmósfera por precipitación y vuelve por evaporación de las superficies o por evapotranspiración desde los componentes bióticos de los ecosistemas terrestres. En estos ecosistemas, parte del agua que ingresa se infiltra en el suelo y el excedente se escurre por la superficie en forma de manto hacia los cuerpos de agua donde es contenida temporalmente (lagos, lagunas) o hacia ríos y lagos que la encauzan hacia otros lugares. Una parte del agua que se infiltra es retenida por las partículas del suelo y el exceso penetra hacia las capas más profundas de la litosfera, alimentando los acuíferos constituidos por las aguas subterráneas. Las características de la cobertura vegetal de los ecosistemas (bosques, pastizales, arbustales), las propiedades de los suelos (entre otros, cantidad de materia orgánica, de arena, arcilla o limo) y la pendiente (área de llanura o sierras) producen variaciones en el balance hídrico de los ecosistemas (Curtis, 2009).

Del total del agua en el mundo, el 97.476% es salada y se encuentra en los mares y océanos, la restante es agua dulce, de la cual el 2.522% se encuentra congelada o dispuesta de forma subterránea, y tan solo el 0.0103% es agua dulce no congelada y superficial distribuida en lagos, ríos, vapor de agua, humedad del suelo, humedales, entre otros, esta agua representa tan solo el 0.3% del agua dulce en el mundo (Carabias et al., 2005). Dicho recurso renovable es utilizado a una tasa acelerada, por lo tanto de manera efectiva, se transforma en recurso no renovables con la subsecuente modificación del ciclo natural. Por consiguiente, a pesar de que el agua dulce es renovable, en la práctica resulta limitada (Aguilar, 2010), lo que le confiere un gran valor ecosistémico, social y económico. Sin embargo en los países en vías de desarrollo se estima que 90% de las aguas residuales se vierten a los ríos y corrientes sin ningún tipo de tratamiento previo.

De los variados beneficios que se obtienen de los ríos y manantiales se encuentran los servicios ecosistémicos culturales, ya que han sido fuente de inspiración para sabios y poetas, a lo largo de la historia humana la fuente de la que brota agua limpia y pura ha significado el punto de encuentro, convivencia y comunicación entre individuos y pueblos. El agua también ha sido un factor crucial para el desarrollo de las civilizaciones y muchas veces, un instrumento de poder. Sin embargo, en el mundo moderno el uso que hace el ser humano del agua ha conducido a su contaminación y a la desaparición de ríos, lagos y mantos freáticos. Actualmente la situación de este precioso líquido es preocupante: según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, en inglés), para el año 2025 la extracción de agua se incrementará en 50% en los países en vías de desarrollo y en 18% en los desarrollados (Cecon, 2003). Dicho recurso ha desempeñado un papel central para el desarrollo de diversas civilizaciones, la sociedad se beneficia ampliamente de los servicios ambientales del agua proveniente de acuíferos, ríos, lagos o costas, y por consiguiente el ser humano ejerce una influencia directa o indirecta sobre ellos y su biota acuática, debido a esto la prosperidad de una sociedad depende en gran medida de su capacidad para utilizar, proteger y regenerar sus recursos hídricos (Aguilar, 2010).

El agua en México

Las condiciones orográficas y climáticas del país han modelado las cuencas en una gran diversidad de tamaños y formas, dando lugar a sistemas hidrográficos tan complejos como la cuenca del río Bravo o sencillos como la cuenca del río Mexcalhuacán. Acercarse a las cuencas de México requiere entonces partir de un mínimo territorial donde se haga factible la perspectiva socioambiental; así la agrupación de cuencas pequeñas posibilita la regionalización, base de este análisis. Al interior de una cuenca, su funcionamiento ecohidrológico se entiende a partir de las relaciones intrínsecas entre usuarios y territorios, cuenca arriba y cuenca abajo, lo cual es abordado a partir de la delimitación de las zonas funcionales. Sin embargo, la coincidencia entre los parteaguas de las cuencas y los límites administrativos requiere de un arreglo metodológico mayor, como es la asignación de municipios a las mismas (Cotler, 2010).

La mayor parte de los recursos hídricos continentales de México se localiza en ríos (68.2%), seguida en importancia por presas (17.8%), acuíferos (11.7%) y lagos y lagunas (2.3%) (Arriaga, 2000). Muchos de estos ecosistemas están física y biológicamente conectados o articulados por el flujo del agua y por el movimiento de las especies, y constituyen una pieza clave para el mantenimiento del ambiente acuático y el bienestar de las comunidades humanas (Carabias et al., 2005). En el país existen cerca de 320 cuencas hidrológicas que suman un volumen medio anual de agua de 410 km³. De acuerdo con el volumen conducido, se distinguen 37 cuencas principales, de las cuales 12 vierten al Golfo de México y el Mar Caribe, 19 al Océano Pacífico y Mar de Cortés, y 6 son endorreicas. Existen también cuatro vastas zonas carentes de drenaje superficial: el Bolsón de Mapimí y la región de El Salado en el Altiplano mexicano y las penínsulas de Baja California y Yucatán, las cuales se catalogan así debido a la escasa precipitación pluvial y a la presencia de suelos con baja capacidad de retención de agua (Aguilar, 2003).

En cuanto a los principales ecosistemas dulceacuícolas naturales de México (Arriaga et al. 2000) se encuentran 50 ríos entre los más caudalosos, sus 70 lagos (sin contar las 137 lagunas costeras), ríos de menor envergadura, tributarios, riachuelos y arroyos permanentes e intermitentes que existen en el territorio nacional, satisfacen las necesidades de la población sobre este bien, desde el consumo del agua potable, el riego de los cultivos y la producción de bienes por la industria hasta la generación hidroeléctrica, ha llevado a la sobreexplotación del agua de manera directa e indirecta y a la construcción de infraestructura hidráulica e hidroeléctrica (incluyendo 4,000 presas y represas). Estas actividades han alterado los caudales (en su volumen, velocidad y calidad), la conectividad y hasta los cursos mismos de los afluentes. Estos factores, junto con las descargas contaminadas de los asentamientos, industrias y zonas agropecuarias han impactado los ecosistemas dulceacuícolas y su biodiversidad de tal manera que sus efectos acumulados han sido muy negativos y, en algunos casos, catastróficos (Carabias, 2005). En relación con los datos de la calidad del agua por cuencas hidrológicas, de acuerdo con estudios elaborados por la Comisión Nacional del Agua y la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, de las 158 cuencas hidrológicas principales del país, 43 reciben una carga orgánica producto de nulo o escaso tratamiento del agua utilizada en servicios urbanos e industria, y una quinta parte de los principales mantos subterráneos de agua en el país registran sobreexplotación y, en consecuencia, un sensible deterioro de su calidad (La Jornada, 2006); mientras que en 2013 de acuerdo con los resultados de las evaluaciones de calidad del agua para tres indicadores (DBO₅, DQO y SST) aplicadas a los sitios de monitoreo, se determinó que 260 sitios están clasificados como fuertemente contaminados en algún indicador, en dos de ellos o en todos (CONAGUA, 2014).

Con base en el aspecto biológico el agua y la biodiversidad no guardan una relación simple. Por ejemplo, con la misma cantidad de agua disponible que en China, Canadá tiene tres veces menos peces y anfibios. Colombia es inusualmente rica en anfibios. México no aparece entre los 15 primeros países en riqueza de peces, pero sí resalta por su riqueza y por su endemismo de anfibios (Figura 2). La clave de estas diferencias biológicas está en la manera en que el agua superficial interactúa con la geología y los climas para crear la diversidad de los cuerpos de agua (Aguilar, 2003).

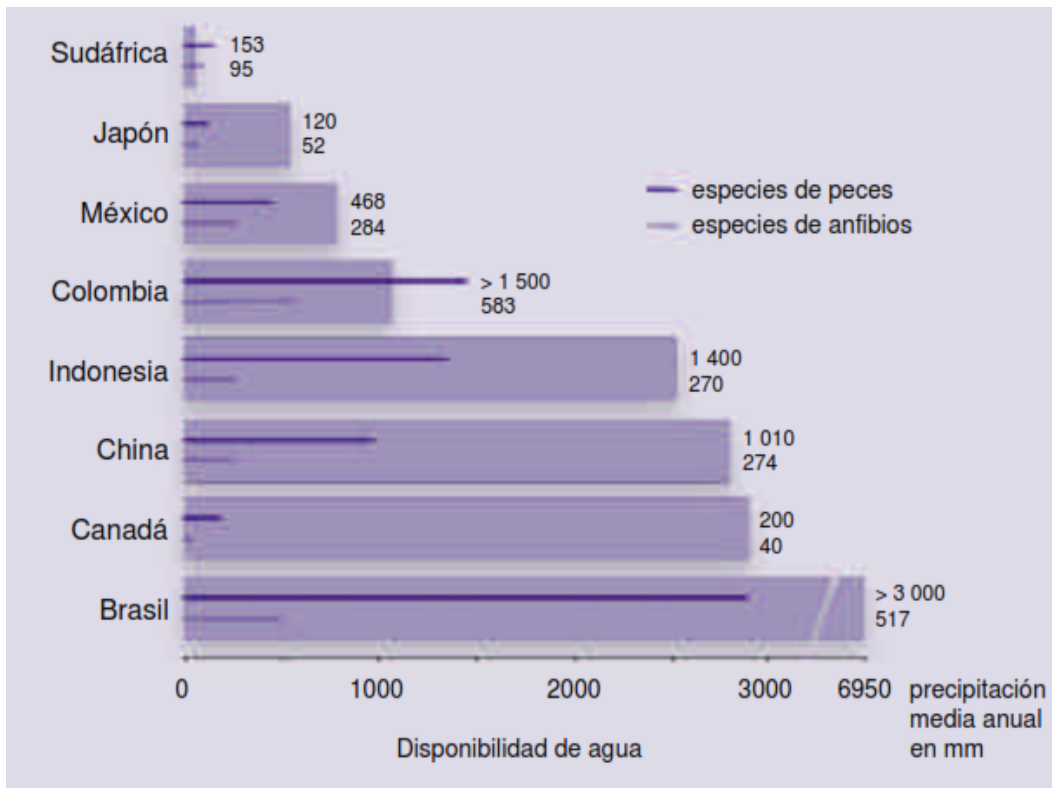


Figura 2. Disponibilidad de agua y especies de peces y anfibios de México en comparación internacional.

El uso del agua para las principales actividades en el país es mayoritariamente para la producción agrícola que usa el 78% del agua disponible. La superficie de regadío representa 33% de la destinada a la agricultura del país y genera más de la mitad de la producción agrícola nacional. En ella se desperdicia poco más de la mitad del agua por la ineficiente operación y su uso inadecuado en parcelas (riego por inundación, problemas de salinización, problemas institucionales y cultivos inapropiados), lo que resulta en una eficiencia promedio de 46%. Entre los principales problemas que impiden que las actividades de riego se planeen e integren en el marco de la sustentabilidad están la extensión de la frontera agrícola sin considerar la disponibilidad de agua, la vocación del suelo, la escasa capitalización de la mayoría de los usuarios, la dificultad para controlar el volumen de agua entregado y las tarifas insuficientes por los servicios de riego y energía eléctrica para bombeo agrícola (Aguilar, 2003).

La calidad del agua

La mayor parte del agua utilizada por los humanos es agua dulce, llamada así por ser baja la concentración de iones y sales en disolución. Los requerimientos de agua varían de acuerdo con la cultura, ubicación geográfica, el tipo de comunidad y la estación del año (Aguilar, 2010) estas sales y minerales son componentes necesarios para ayudar a mantener la salud y la vitalidad de los organismos que dependen de los servicios brindados por ecosistemas acuáticos. La calidad de cualquier cuerpo acuático superficial o subterráneo está en función de los procesos naturales y actividades humanas. Sin la influencia humana, la calidad del agua sería determinada por la meteorización del material geológico, por los procesos atmosféricos de evapotranspiración y la

deposición de polvo y sal por el viento, por la lixiviación natural de materia orgánica y nutrientes del suelo, por factores hidrológicos determinados por la escorrentía, y los procesos biológicos dentro del medio acuático que modifican la composición física y química del agua (PNUMA, Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente/Agua, 2007; PNUMA, 2008).

En México, la calidad de agua se monitorea con más de 400 estaciones permanentes y 200 semifijas o móviles de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad de Agua; la mayoría de éstas se ubican en cuerpos de agua interiores y acuíferos (Aguilar, 2003).

Durante el 2001 los criterios de evaluación de calidad del agua se modificaron por un nuevo índice con dos parámetros, los cuales permiten reconocer gradientes de agua que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana, hasta indicios o aportaciones importantes de aguas residuales de tipo doméstico, industrial o una mezcla de ambas, también brindan información fundamental para la toma de decisiones en cuanto al sistema de tratamiento apropiado, lo que representa un esfuerzo de muestreo y costo menor que si se considera una serie de mayor número de parámetros, aunque se puede considerar que existan ciertos sesgos, estos parámetros son la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) (Aguilar, 2010; CNA, 2011).

En el ambiente acuático están presentes en mayor o menor grado un grupo de compuestos que, en conjunto, reciben el nombre de nutrientes. Estos participan en la síntesis de la materia orgánica por los productores, los cuales básicamente son los iones de nitrógeno (NO_3^- , NO_2^- y NH_4^+) y fósforo (PO_4^{3-}), necesarios para formación de proteínas, aminoácidos, nucleótidos, etc.; junto con la temperatura y la luz, son los responsables abióticos de la productividad biológica en los sistemas acuáticos; razón por la cual, su evaluación genera datos valiosos obtenidos con herramientas metodológicas de rutina en la Hidrobiología (De la Lanza, 1990). Su importancia va aún más allá, puesto que incluso pueden servir como indicadores de la productividad primaria y estado trófico de los sistemas acuáticos (Reid y Wood, 1976; Wetzel, 2001).

Conductividad eléctrica

La conductividad electrolítica es una expresión numérica de la capacidad de una solución para transportar una corriente eléctrica. Esta capacidad depende de la presencia de iones, de su concentración total, de su movilidad, valencia y concentraciones relativas, así como de la temperatura (NMX-AA-093-SCFI-2000). La salinidad es un indicador de la concentración de sales disueltas en un cuerpo de agua. Los iones responsables de la salinidad incluyen cationes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , y K^+) y aniones (CO_3^{2-} y HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^-). El nivel de salinidad en sistemas acuáticos es importante para las plantas y los animales acuáticos que sólo pueden sobrevivir dentro de ciertos rangos de salinidad (Friedl et al., 2004). Aunque algunas especies se adaptan bien a sobrevivir en ambientes salinos, el crecimiento y la reproducción de muchas especies puede verse obstaculizada por el aumento de la salinidad (UNEP GEMS, 2008).

El valor de conductividad es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua

para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano (NMX-AA-093-SCFI-2000).

Las unidades de la conductividad eléctrica son 1/ohm-cm o mho/cm. La conductividad se reporta generalmente en micromhos/cm ($\mu\text{mhos/cm}$). En el Sistema Internacional de Unidades (SI), el recíproco del ohm es el siemens (S) y la conductividad se reporta en milisiemens/metro (mS/m) o $\mu\text{S/cm}$ (Fuentes & Massol-Deyá, 2002). Para los cuales se utilizan las siguientes expresiones de conversión, cambiando de un sistema de medidas al otro:

$$1 \text{ mS/m} = 10 \mu\text{mhos/cm}; \quad 1 \mu\text{S/cm} = 1 \mu\text{mhos/cm}$$

Nitrógeno y sus diferentes formas químicas

El nitrógeno se integra en el ecosistema como un gas, gracias a la actividad metabólica de las bacterias fijadoras, posteriormente regresa a la atmósfera, también en estado gaseoso durante el proceso de desvitrificación, pero su movimiento dentro del ecosistema se produce en solución como ion amonio (NH_4^+), durante esta circulación de estos iones en el ecosistema se involucra un gasto de energía, como consecuencia de la actividad metabólica de los descomponedores los compuestos orgánicos son degradados a sustancias inorgánicas que quedan disponibles en el suelo o el agua, desde allí, estas sustancias se vuelven a incorporar a los tejidos de los productores primarios, pasan a los consumidores y a los detritívoros y luego a los descomponedores, desde los cuales entran nuevamente en las plantas y así se repite el ciclo (Curtis, 2009).

El nitrógeno es un elemento primordial para el desarrollo de los organismos, su ciclo es regulado principalmente por la actividad biológica y es sumamente complejo, debido a la gran variedad de especies químicas que ocurren en el ecosistema en función del potencial de óxido reducción (Guerra y Cruz, 2014).

Por la importancia del nitrógeno en su papel como nutrimento indispensable para la supervivencia y productividad del ecosistema, así como su papel como uno de los más importantes contaminantes en agua y atmósfera, es de suma importancia monitorearlo e identificar su dinámica específica en cada sistema hídrico (Guerra y Cruz, 2014).

Las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas naturales y residuales son, por orden decreciente de su estado de oxidación, nitrato, nitrito, amoniaco y nitrógeno orgánico. Todas esas formas del nitrógeno, lo mismo que el nitrógeno gaseoso (N_2), son interconvertibles bioquímicamente y forman parte del ciclo del nitrógeno (APHA-AWWA-WPCF-1992).

El nitrato se encuentra sólo en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas recientes, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico nitrificante, el nitrato puede encontrarse en concentraciones de hasta 30 mg de nitrato como nitrógeno/L. Es un nutrimento esencial para muchos autótrofos fotosintéticos, y en algunos casos ha sido identificado como el determinante de crecimiento (APHA-AWWA-WPCF-1992). El nitrito es un estado intermedio de la oxidación del nitrógeno, tanto en la oxidación del amoniaco a nitrato como en la reducción del nitrato. Esa oxidación y reducción pueden ocurrir en las plantas de tratamiento de aguas residuales, sistemas de distribución del agua y

aguas naturales. El nitrito es el agente causal real de la metahemoglobina (APHA-AWWA-WPCF-1992).

El amoníaco se encuentra de forma natural en las aguas superficiales y residuales. Su concentración suele ser baja en las aguas subterráneas debido a que es absorbido en las partículas y arcillas del suelo y no se extrae fácilmente por lixiviación. Se produce en gran parte por desaminación de los compuestos orgánicos nitrogenados y por hidrólisis de la urea. En algunas plantas de tratamiento del agua, se añade amoníaco para que reaccione con el cloro y forme cloro residual combinado (APHA-AWWA-WPCF-1992),

Fósforo orgánico e inorgánico

El fósforo en general se encuentra en concentraciones bajas en los ecosistemas, proviene de rocas fosfatadas que se desintegran y desgastan lentamente por acción de factores ambientales y liberan el mineral que se convierte en una sal en solución en el agua o en el suelo. Las plantas terrestres lo absorben como ion fosfato a través de las raíces. Luego de circular por la cadena trófica, vuelve al suelo por el trabajo de los descomponedores. Una gran proporción de este mineral es transportada por el agua hacia el mar y eventualmente se deposita en el fondo. Así, luego de miles de millones de años, volverá a participar en la formación de nuevas rocas sedimentarias. Las corrientes marinas que ascienden desde las profundidades del océano llevan a la superficie cierta cantidad de fósforo que es absorbido con rapidez por el fitoplancton y se desplaza a lo largo de las cadenas tróficas marinas. Una parte vuelve al continente a través de la actividad pesquera y otra lo hace a través del guano de las aves que se alimentan de peces, el cual no sólo es rico en fósforo, sino también en nitrógeno (Curtis, 2009).

Se encuentra de forma orgánica e inorgánica y sufre transformaciones físicas, químicas y biológicas que definen su permanencia en reservorios, su bioasimilación o su transporte a través escurrimientos, lixiviación y su flujo unidireccional hacia los sedimentos y el mar. Es sometido de manera natural a reacciones de precipitación con iones cargados positivamente, lo que favorece su absorción y adsorción en suelos y sedimentos. El fósforo en solución es fácilmente asimilado, aprovechado y transformado por los productores primarios, recuperándose parte de él, en el momento de la muerte de los organismos, siendo almacenado en suelos y sedimentos para su mineralización. Debido a que en condiciones naturales los átomos de fósforo están totalmente combinados con el oxígeno, formando la única especie química representativa del fósforo inorgánico, los Ortofosfatos (PO_4^{3-}) (Guerra y Cruz, 2014).

El fósforo se presenta en los reservorios de agua como:

1. Fósforo en suspensión de la materia particulada que incluye:

Fósforo en los organismos en forma de:

- Ácidos nucleicos y fosfoproteínas.
- Ésteres de bajo peso molecular.
- Fosfatos de nucleótidos.

- Fósforo adsorbido a materia orgánica particulada muerta.

2. Fósforo inorgánico disuelto compuesto por:

- Ortofosfatos, única forma inorgánica significativamente importante en los sistemas limnológicos.
- Polifosfatos, procedentes principalmente de detergentes.
- Coloides orgánicos o fósforo combinado con coloides adsorbentes.

Estas formas del fosfato surgen de una diversidad de fuentes. Cantidades pequeñas de algunos fosfatos condensados se agregan a algunos suministros de agua durante el tratamiento, y se pueden añadir cantidades mayores de los mismos compuestos cuando el agua se utiliza para lavar ropa u otras limpiezas, ya que son los componentes principales de muchos preparados comerciales para la limpieza. Los fosfatos se utilizan ampliamente en el tratamiento de aguas de calderas. Los ortofosfatos aplicados como fertilizantes a la tierra cultivada o residencial son arrastrados a las aguas superficiales con las lluvias y, en menor proporción, con la nieve derretida (APHA-AWWA-WPCF-1992).

Materia orgánica y sus demandas de oxígeno

Como resultado de la contaminación por grandes cantidades de materia orgánica que se descargan en un curso de agua los microorganismos se ponen en acción y utilizan oxígeno para su descomposición en el detritus de la biota del cauce. Una medida sencilla del potencial de la materia orgánica para la desoxigenación de agua viene dada por la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), que se determina en el laboratorio mediante la incubación de una muestra de agua durante cinco días a 20° C y determinando el oxígeno utilizado (Harrison, 1996). Estrictamente la Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días.

La determinación del requerimiento bioquímico de oxígeno es una prueba empírica en la que se utilizan procedimientos estandarizados de laboratorio para determinar los requerimientos relativos de oxígeno de las aguas residuales, efluentes y contaminadas. La prueba tiene su aplicación más extendida en la determinación de las capas residuales en las instalaciones de tratamiento y en la evaluación de la eficacia de extracción del DBO de tales sistemas de tratamiento (APHA-AWWA-WPCF-1992). La Demanda Química de Oxígeno (DQO). Se utiliza como una medida del equivalente de oxígeno del contenido de materia orgánica de una muestra susceptible de oxidación por un oxidante químico fuerte. Para las muestras de una fuente específica, la DQO puede relacionarse empíricamente con la DBO₅, el carbono orgánico o la materia orgánica.

ZONA DE ESTUDIO

La subcuenca de San Martín Texmelucan se encuentra dentro de los municipios de Puebla: Tlahuapan, San Salvador el Verde, San Martín Texmelucan, Chiautzingo, Huejotzingo, San Felipe Teotlalcingo y en el estado de Tlaxcala en el municipio de Tepetitla de Lardizabal (Figura 3 y 4).

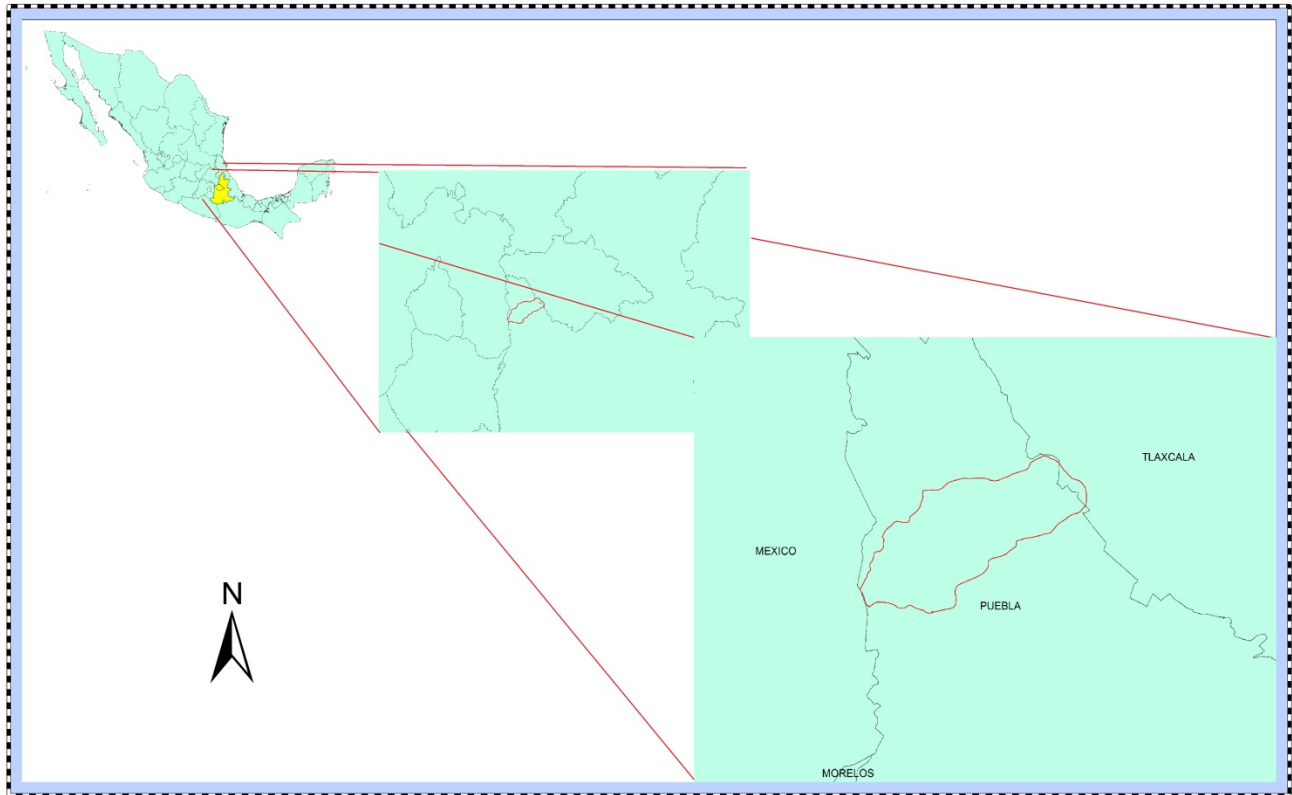


Figura 3. Localización de la subcuenca en los estados de Tlaxcala y Puebla.

La parte más alta de la subcuenca comprende parte del PNIP (CONANP, 2010) en las subzonas de Influencia, Uso Público y Preservación (Figura 3).

La subzona de Preservación se caracterizan por tener sitios en donde los recursos naturales han sido aprovechados de manera tradicional y continua por la población vecina, sin ocasionar alteraciones significativas en el ecosistema. La subzona de Uso Público se caracteriza por contener sitios que presentan atractivos naturales para la realización de actividades de recreación y esparcimiento, en donde es posible mantener concentraciones de visitantes en los límites que se determinen con base en la capacidad de carga de los ecosistemas. La SEMARNAT (2013) delimita la zona de influencia del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl considerando las superficies boscosas en buen estado de conservación o susceptibles de restauración que van siguiendo un anillo o buffer de un kilómetro de separación con respecto a los linderos del parque.

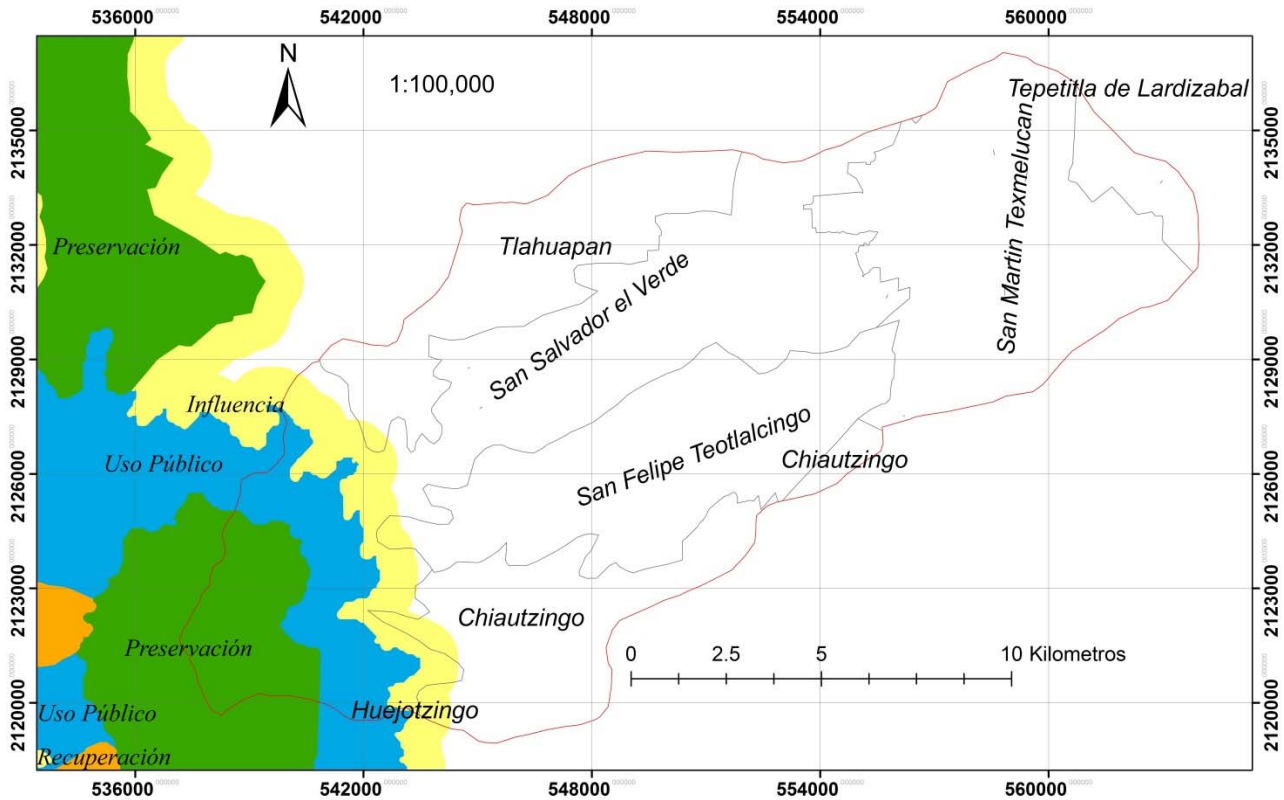


Figura 4. Municipios de la subcuenca de San Martín Texmelucan y zonificación del Parque Nacional Izta-Popo.

En la subcuenca de acuerdo con INEGI (2005) se encuentran los siguientes tipos de vegetación: Pradera de alta montaña, bosque de pino, bosque de oyamel, bosque de pino-encino, agricultura de temporal anual y permanente y agricultura de riego anual y semipermanente. Los climas encontrados son Frio con temperatura media anual entre -2°C y 5°C , Semifrío subhúmedo con verano fresco largo, presentando una temperatura media anual entre 5°C y 12°C y por último Templado subhúmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C (García y CONABIO, 1998). En la región predominan los suelos de tipo litosol, regosol dístico, andosol húmico, regosol étrico, cambisol húmico, fluvisol étrico, regosol étrico, phaeozem háplico y cambisol étrico (INEGI, 2014).

La subcuenca baja, forma parte del Valle de Texmelucan, éste es parte de otro más extenso, que es el Valle de Puebla y este último está ubicado en el Eje Neovolcánico, lo que determina el relieve del lugar, continuando hacia el poniente, el relieve se vuelve pronunciado hasta llegar al Iztaccíhuatl (INAFED, 2010). Según el Mapa Digital de México la zona tiene la siguiente geología: roca ígnea extrusiva de tipo andesita perteneciente al Cenozoico, roca ígnea extrusiva de tipo toba intermedia perteneciente al Cenozoico y roca ígnea extrusiva de tipo brecha volcánica básica perteneciente al Cenozoico (INEGI, 2014).

La subcuenca pertenece a la cuenca del río Atoyac, una de las cuencas más importantes del estado de Puebla, tiene su nacimiento entre los límites del estado de México y Puebla en la vertiente oriente de la Sierra Nevada. Por su ubicación el municipio pertenece a la parte occidental de la cuenca alta del

Atoyac. Los ríos que lo atraviesan, generalmente de oeste a este, Proviene de la Sierra Nevada y son tributarios del Atoyac; en tanto que los ventisqueros del Iztaccíhuatl pueden almacenar agua y alimentar los poblados y terrenos de sus faldas en la época de sequía; las rocas y suelos dejan infiltrar el agua hasta grandes profundidades, por lo que al pie de los volcanes puede obtenerse agua de pozos durante todo el año (INAFED, 2010).

La flora y fauna de la zona de estudio no está clasificada de manera integral, por lo tanto corresponde de manera genérica a la de clima templado subhúmedo del altiplano mexicano. Las zonas más elevadas del Iztaccíhuatl están cubiertas de nieve y a su alrededor presenta praderas de alta montaña; las faldas inferiores de la Sierra Nevada están dedicadas en su mayoría a la agricultura de temporal. Al oriente presenta zonas de agricultura de riego, que forma parte de la gran zona de regadío que circunda San Martín Texmelucan. Existe una vegetación secundaria, originada por la destrucción de la primaria, está compuesta de bosques de pino, encino, semiárido (pino oaxaqueño, pino cembroides y encinos deciduos), combinados con terrenos de agricultura de riego y temporales, dedicados al cultivo de maíz, frutas y legumbres regionales. En su totalidad los árboles pertenecen al grupo mesotécnico-xerofílico.

La fauna está representada por: ardillas (*Sciuridae*), conejo de campo (*Oryctolagus cuniculus*), venados (*Cervidae*), tejones (*Mustelidae*), armadillos (*Dasypodidae*), tlacuaches (*Didelphidae*), coyote (*Canis latrans*), una gran variedad de serpientes de cascabel (*Crotalus*), chirrionera (*Masticophis flagellum*), cincuate (*Pituophis deppei*), escorpiones (*Scorpionida*), ratas (*Muridae*) y ratón de campo (*Apodemus sylvaticus*), el gavilán (*Accipiter nisus*), zopilote (*Coragyps atratus*), águilas (*Accipitridae*), tecolotes (*Strigidae*), aves migratorias como garza de pata negra (*Ardea alba*), gorriones (*Passeridae*), insectos (*Insecta*), peces óseos (*Osteichthyes*), anfibios (*Amphibia*) y murciélagos (*Chiroptera*), cacomixtle (*Bassariscus*), onza (*Puma yagouaroundi*), tuza (*Geomysidae*), cuijes (*Teiidae*), chintetes (*Sceloporus*), primavera (*Turdus migratorius*), canarios (*Serinus canaria*), trigrillos (*Pheucticus melanocephalus*), carpinteros (*Picidae*), golondrinas (*Hirundinidae*) y huitlacoques (*Toxostoma*). La fauna doméstica se compone de perros (*Canis lupus familiaris*), gatos (*Felis silvestris catus*), burros (*Equus africanus asinus*), acémilas o mulas (*Equus africanus x ferus*), ganado bovino (*Bos primigenius*), ovino (*Ovis orientalis*), equino (*Equus ferus caballus*), porcino (*Sus scrofa domestica*), conejos y liebres (*Leporidae*), patos (*Anatidae*), guajolotes (*Meleagris gallopavo*) y pollos (*Gallus gallus domesticus*) (INAFED, 2010).

Así mismo el Iztaccíhuatl está incluido en el Área de Importancia para la Conservación de Aves Silvestres “Volcanes Iztaccíhuatl-Popocatepetl” en donde se han registrado 320 especies de ellas. Dentro de las endémicas de México, las más importantes son: la perdiz de los volcanes o gallina montés (*Dendrortyx macroura*) y rapaces como aguililla (*Accipiter striatus*), halcón o aguililla de Harris (*Parabuteo unicinctus*), halcón peregrino (*Falco peregrinus*), búho (*Bubo virginianus*) u halcón aguililla colirojiza (*Buteo jamaicensis*) (Neyra, 2012).

JUSTIFICACIÓN

La demanda de los recursos naturales ha aumentado en las últimas décadas para satisfacer las necesidades sociales, con ello se han producido alteraciones en las cuencas, en su cubierta vegetal y por lo tanto en la calidad del agua. Debido al incremento en la deforestación, el caudal de los sistemas lóticos se ve afectado por la erosión del suelo, aunado a esto los agroquímicos (compuestos formados principalmente de fósforo y nitrógeno) usados en actividades agrícolas, son arrastrados hacia los ríos, mientras que las descargas de aguas residuales municipales hacia los afluentes generan una influencia negativa en la calidad del agua debido al aporte de materia contaminante.

Actualmente no hay estudios que evalúen estos impactos sobre la calidad del agua y los caudales, así mismo los cambios en los patrones del uso del suelo en nuestro país no son estudiados en su gran mayoría a pesar de que son necesarios para conocer el uso y manejo que se les ha dado y que se les puede dar a los recursos naturales. Por esto es necesario un análisis espacial de dichos cambios, para conocer la relación entre la calidad del agua y los patrones del uso de suelo para proponer estrategias dirigidas a la conservación del capital natural y la optimización de su uso.

HIPÓTESIS

Con base en los antecedentes, se considera que el cambio en el uso del suelo es resultado del manejo que se le ha dado a los recursos naturales, por lo que su análisis permite conocer el impacto en la temporalidad de los sistemas lóticos de la subcuenca de San Martín Texmelucan y en su variabilidad física y química.

OBJETIVOS

General

Establecer la relación entre los cambios en el uso del suelo y la calidad del agua en la subcuenca de San Martín Texmelucan con base en información geográfica acerca del uso de suelo para los años 2010, 1999 y 1993.

Específicos

- Conocer el estado de los sistemas lóticos en la subcuenca con base en el uso del suelo y la calidad del agua.
- Evaluar química y físicamente el agua de la red hidrológica en la zona de estudio.
- Elaborar los mapas de la subcuenca de San Martín Texmelucan de uso de suelo para los años 2010, 1999 y 1993 para así establecer las tasas de cambio entre las tres épocas.
- Comparar el periodo de actividad de los sistemas lóticos en los sitios de muestreo durante el periodo 2013-2014 con respecto a la información de la Red Hidrológica del INEGI (1994) para las alteraciones producidas en el ciclo hídrico por el uso de suelo.

MÉTODO

Trabajo de gabinete (primera fase)

Los sistemas ribereños se eligieron basándose en las coberturas del suelo adyacentes a los ríos dentro de la subcuenca con base en la revisión cartográfica de la Red hidrológica, mapas topográficos y ortofotografías proporcionados por el INEGI, los muestreos se llevaron a cabo de Junio del 2013 a Noviembre del 2014 con la finalidad de analizar física y químicamente el agua de sistemas ribereños, así como describir las características de los usos del suelo en los sitios de muestreo. Se realizaron puntos de verificación de los usos del suelo en el recorrido a través de la subcuenca los cuáles se usaron para comparar la información con las ortofotografías digitales.

Trabajo de campo

En cada sitio de muestreo se realizó la georreferenciación con un GPS Garmin 62sc, descripción de la vegetación y sus alteraciones, así como observaciones sobre la presencia de perturbación antrópica en el ambiente natural. *In situ* se determinó conductividad eléctrica (APHA-AWWA-WPCF-1992) con un potenciómetro (Combo HANNA modelo HI 98129) y oxígeno disuelto con un oxímetro YSI Model: 55-25FT (Figuras 5 y 6). Las muestras de agua se tomaron de forma manual, se preservaron y analizaron en laboratorio de acuerdo con lo mencionado en APHA-AWWA-WPCF, 1992 para DQO (Figura 7), DBO₅ (NMX-AA-028-SCFI-2001), fósforo total (NMX-AA-029-SCFI-2001), ortofosfatos (APHA-AWWA-WPCF-1992) (Figura 8), nitratos (APHA-AWWA-WPCF-1992), nitritos (NMX-AA-154-SCFI-2011) y amonio (APHA-AWWA-WPCF-1992), adaptados a la microescala según Gómez, et al. (2014); Guerra y Cruz (2014). Los fundamentos de cada parámetro evaluado se encuentran a continuación:

La determinación de conductividad es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua natural, potable, residual, residual tratada, de proceso o bien del agua para ser usada en el laboratorio en análisis de rutina o para trabajos de investigación.

Para la cuantificación de nitrógeno en sus diferentes formas se determinaron de la siguiente manera: para nitrato se usó el método del ácido fenoldisulfónico, el cual se basa en un principio colorimétrico, en donde el ácido fenoldisulfónico reacciona con el nitrato en ausencia de agua para formar un compuesto nitroderivado, que en medio alcalino es alterado ligeramente para producir un compuesto de color amarillo, la intensidad del color es proporcional a la concentración del nitrato en la muestra permitiendo su análisis por colorimetría. Los nitritos se determinaron por la formación de un compuesto azoico de color púrpura rojizo, producido a pH 2-2.5 por unión de ácido sulfanílico diazonizado con el clorhidrato de naftilamina conocido como el método del ácido sulfanílico. En el tratamiento de las muestras con el método del fenato se evalúa la concentración de amonio, la cual se fundamenta en la reacción entre el amonio, hipoclorito y el fenol, catalizada por la sal manganosa, produciendo un compuesto de color azul llamado indofenol, el cual absorbe a 640 nm (Guerra y Cruz, 2014).

Para fósforo se utilizó el siguiente método: los ortofosfatos solubles se transforman en un complejo colorido de fosfomolibdato por reacción con el molibdato de amonio en medio ácido. Presentándose

una coloración azul, que se incrementa en forma proporcional a la cantidad de ortofosfatos presente en la muestra, después de que el molibdeno reacciona con un agente reductor que generalmente es el cloruro estano. Mientras que para la medición de fósforo total se usa el método de la digestión con persulfato en el cuál las diferentes formas de fósforo son hidrolizadas a fosfatos por tratamiento con ácido, calentamiento y presión, midiéndose la concentración de fosfato por el método del fosfomolibdato (Guerra y Cruz, 2014). El método se basa en medir el oxígeno consumido por una población microbiana en condiciones en las que se han inhibido los procesos fotosintéticos de producción de oxígeno en condiciones que favorecen el desarrollo de los microorganismos (NMX-AA-028-SCFI-2001).

Para la demanda bioquímica de oxígeno el método consiste en llenar con agua de la muestra una botella hermética e incubarla a la temperatura ambiente a 25°C por 5 días. El oxígeno disuelto se obtiene de la diferencia entre la demanda de oxígeno inicial y final, debido a que al inicio de la incubación y después de 5 días se realiza la medición, todo el consumo de oxígeno que ocurre después de que se hizo la primer medición se incluye en la medición de DBO₅ (APHA-AWWA-WPCF-1992). En cambio, para DQO se valora mediante el método colorimétrico de reflujo cerrado. Cuando un simple digerido, el ion dicromato oxida la materia orgánica en la muestra, resulta en el cambio de cromo de estado hexavalente (VI) al estado trivalente (III). Ambas especies de cromo son de color y absorben la luz de la región visible del espectro. El ion dicromato (Cr₂O₇⁻²) absorbe fuertemente en la región de 400 nm, donde la absorción de iones de cromo (Cr⁺³) es mucho menor (APHA-AWWA-WPCF-1992).



Figura 5. Muestreo de agua.



Figura 6. Descripción de la vegetación en campo.



Figura 7. Determinación de DQO. Figuración 8. Determinación de ortofosfatos.

Además de los sitios de muestreo se realizaron puntos de verificación (Figuras 9 y 10) en donde se detallaron las características de la vegetación y del sistema lótico, además de georreferenciar los puntos para la posterior elaboración de los mapas de cobertura del suelo.



Figuras 9 y 10. Verificación en campo de las coberturas del suelo.

Trabajo de gabinete (segunda fase)

El método utilizado consta de una parte conceptual y otra metodológica. En la conceptual, de acuerdo con Bocco et al. (2001), analizar el proceso de cambio de uso y cobertura del terreno implica tres pasos principales:

- a) Detección e interpretación cartográfica y digital del cambio.
- b) Análisis de los patrones de cambio de cobertura y uso del suelo.

c) Análisis de las causas del cambio de uso del suelo.

Los mapas de uso de suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan para las tres épocas (2010, 1999 y 1993) fueron elaborados por medio de ortofotografías digitales proporcionadas por el INEGI (Cuadro 2).

Cuadro 2. Tipos de ortofotos y sus características para la realización de los mapas de coberturas del suelo.

Año de Vuelo	Escala	Resolución (m)	Tipo	Datum
2010	1:10,000	1	Color	ITRF92
1999	1:20,000	1.5	Pancromática	ITRF92
1993	1:20,000	2	Pancromática	NAD27

Las cuales fueron la referencia para elaborar polígonos con los usos de suelo por fotointerpretación en software con el programa ArcGis 10.3 for Desktop, se clasificaron de acuerdo a las siguientes características:

- Número de clase fotográfica
- Alineación
- Color o Escala de grises
- Textura

De acuerdo a las clases fotográficas con la ayuda de los recorridos en campo y puntos de verificación se determinaron los usos del suelo las cuales sustituyeron a las clases para conformar los mapas (Figura 11).

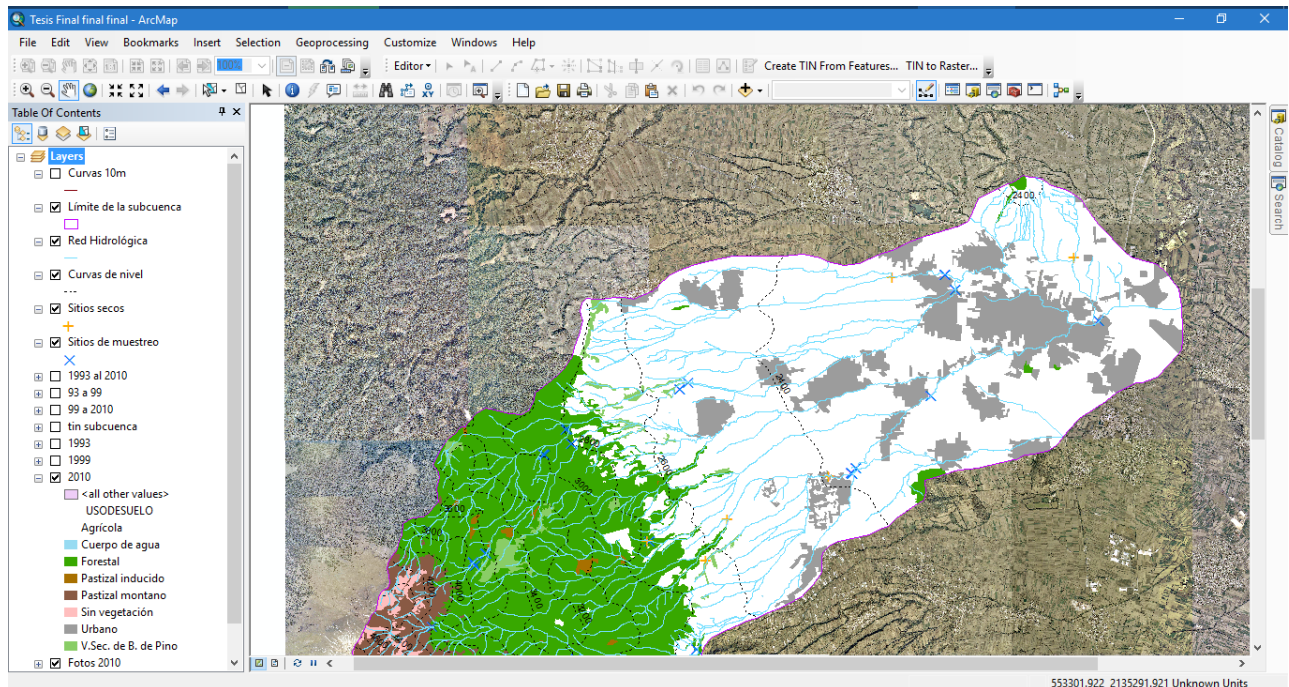


Figura 11. Uso del programa ArcGis 10.3 para la elaboración de los mapas de usos del suelo.

Posteriormente se calcularon las áreas de los polígonos para cada shapefile de las 3 temporadas, después los datos fueron usados en Excel para calcular las áreas totales de cada uso del suelo durante las 3 temporadas, estos datos sirvieron para la elaboración de diversas gráficas.

Los tipos de procesos de cambio de usos del suelo (Figura 12) se ajustaron a partir de los propuestos por Galicia & García-Romero (2007):

1. La *deforestación* es el cambio de bosque al cultivo o pastizal.
2. La *permanencia* es la persistencia de urbanización, cultivo, vegetación secundaria de bosque de pino, cuerpos de agua y de pastizal entre 2 fechas.
3. *Sustitución* representa la transformación entre pastizal, cuerpo de agua o cultivo.
4. *Regeneración* representa el cambio de vegetación secundaria de bosque de pino, pastizal montano, pastizal inducido o cultivo a bosque, de pastizal inducido, sin vegetación aparente o cuerpo de agua a pastizal montano y también de pastizal montano a vegetación secundaria de bosque de pino.
5. La *urbanización* es el cambio de los bosques, el cultivo y el pastizal inducido a uso habitacional.
6. La *conservación* es la persistencia de los pastizales montanos y los bosques entre 2 fechas
7. La *revegetación* es el cambio de agricultura o pastizales inducidos a vegetación secundaria,
8. La *alteración* es el cambio de bosques a vegetación secundaria y pastizal montano, de vegetación secundaria de bosque de pino a pastizal inducido y agricultura, así mismo de pastizal montano a pastizal inducido y a sin vegetación aparente.

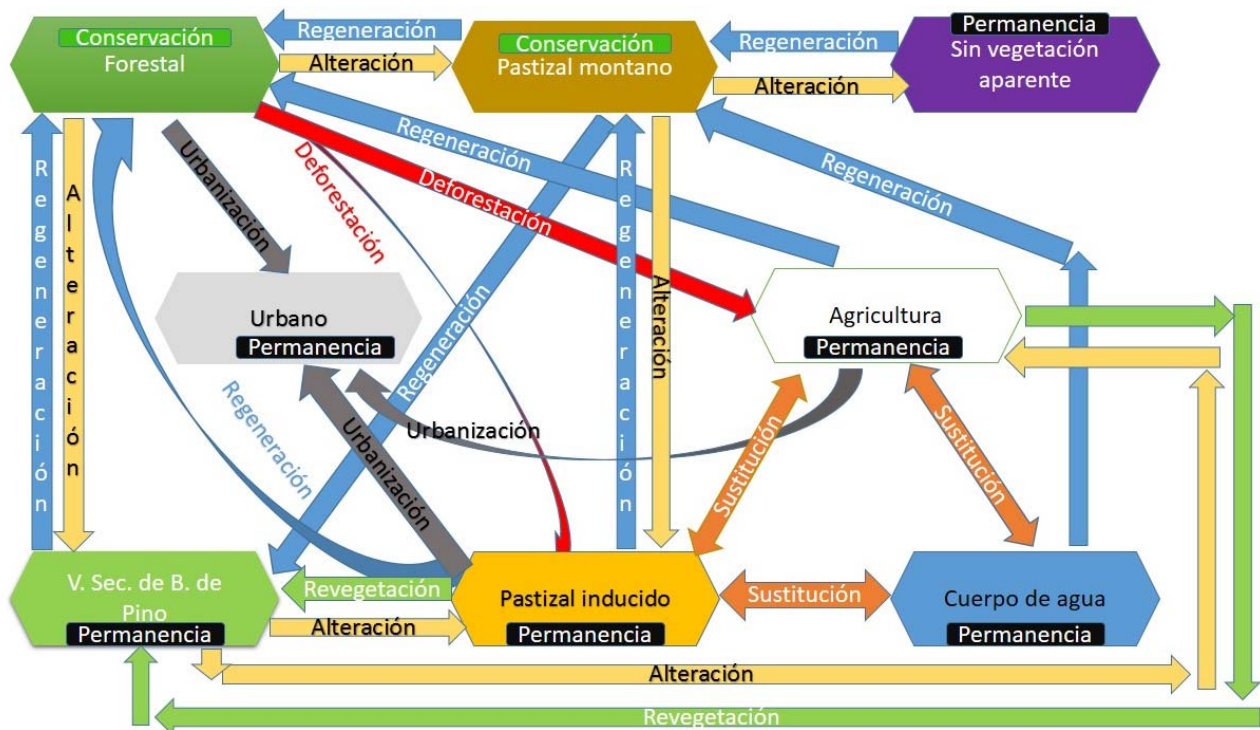


Figura 12. Diagrama de procesos de cambio para los usos del suelo (Soria, 2016).

Aplicando álgebra de mapas se calcularon las áreas en los cambios de uso del suelo y posteriormente las tasas de cambio entre las tres épocas.

Las tasas de deforestación fueron calculadas mediante un modelo exponencial discreto sugerido por Trejo y Dirzo (2000):

$$r = 1 - \left(1 - \frac{A1 - A2}{A1}\right)^{1/t}$$

Dónde:

- **r** es la tasa de cambio anual
- **A1** es el área cubierta al inicio del periodo
- **A2** es el área cubierta al final del periodo
- **t** es el número de años del periodo de análisis

Obtenidas las tasas de cambio se calculan las prospecciones para los años 2020 y 2040 para cada tipo de uso mediante el despeje de la ecuación quedando de la siguiente forma:

$$A2 = A1(1 - r)^t$$

La herramienta del INEGI conocida como Simulador de Flujos de agua y Cuencas hidrológicas (SIATL) versión 3.1 se usó para la obtención de las estadísticas de los sitios secos para conocer las características del área que ha sido afectada con la pérdida de los flujos de agua.

Trabajo estadístico

Se agruparon los sitios de muestreo por el uso de suelo que presentaron las zonas adyacentes a los sistemas lóticos junto con los manantiales, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para comparación de medianas de los parámetros para las coberturas del suelo. Se aplicó el análisis para la comparación de dos intervalos altitudinales 2250-2800 m s. n. m. & 2800-4100 m s. n. m. (se tomó como referencia el límite de los 2800 m s. n. m. ya que es donde se da el cambio entre los usos de suelo antrópicos y los naturales separando bosques y cultivos) por la prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para la comparación de medianas con ayuda del programa Statgraphics Centurion XVI (Figura 13).

CALIDAD DEL AGUA Y EL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN LA SUBCUENCA DE SAN MARTÍN TEXMELUCAN.

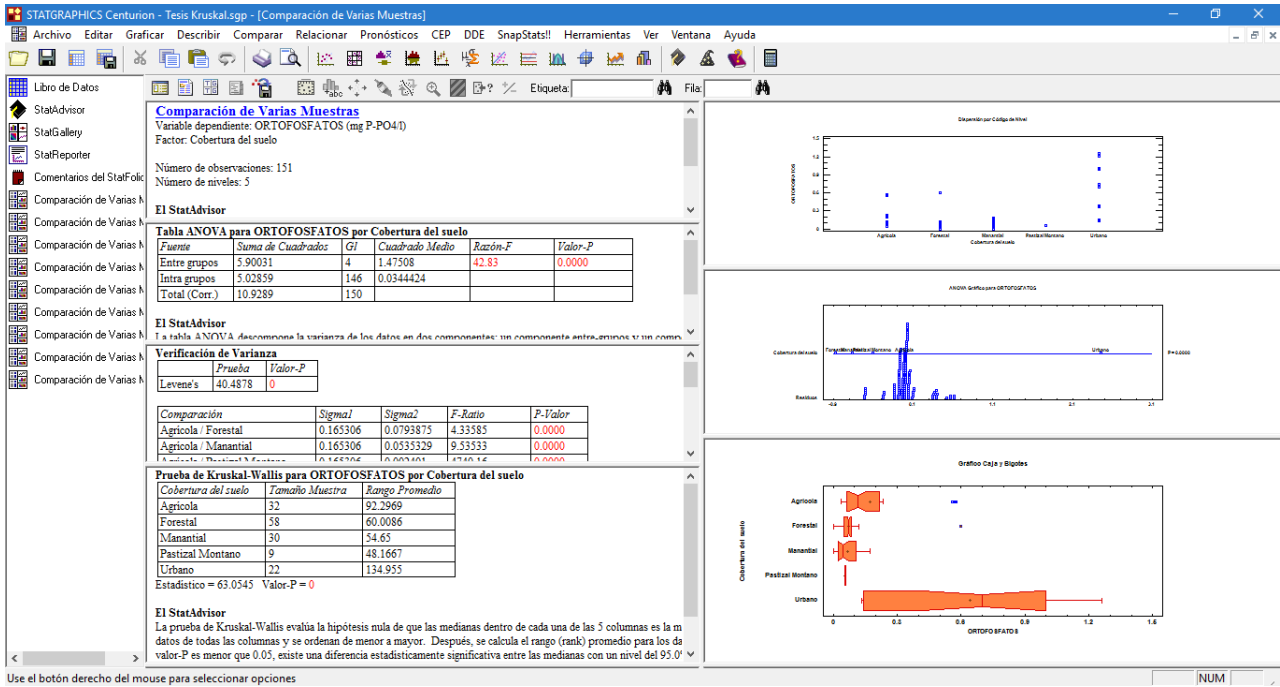


Figura 13. Utilización del programa Statgraphics Centurion XVI para el análisis estadístico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En total se muestrearon 20 sitios a lo largo de toda la subcuenca de junio del 2013 a noviembre del 2014 (Figura 14 y Cuadro 4), de los cuales 11 se encuentran en la parte baja y 9 en la parte alta, las muestras se tomaron en época de estiaje y lluvias para cada sitio. Mientras que con los recorridos en campo se efectuaron 17 puntos de verificación de los usos de suelo y vegetación, de los cuales 6 resultaron afectados totalmente en su flujo siendo actualmente sitios secos (Figura 14 y Cuadro 3).

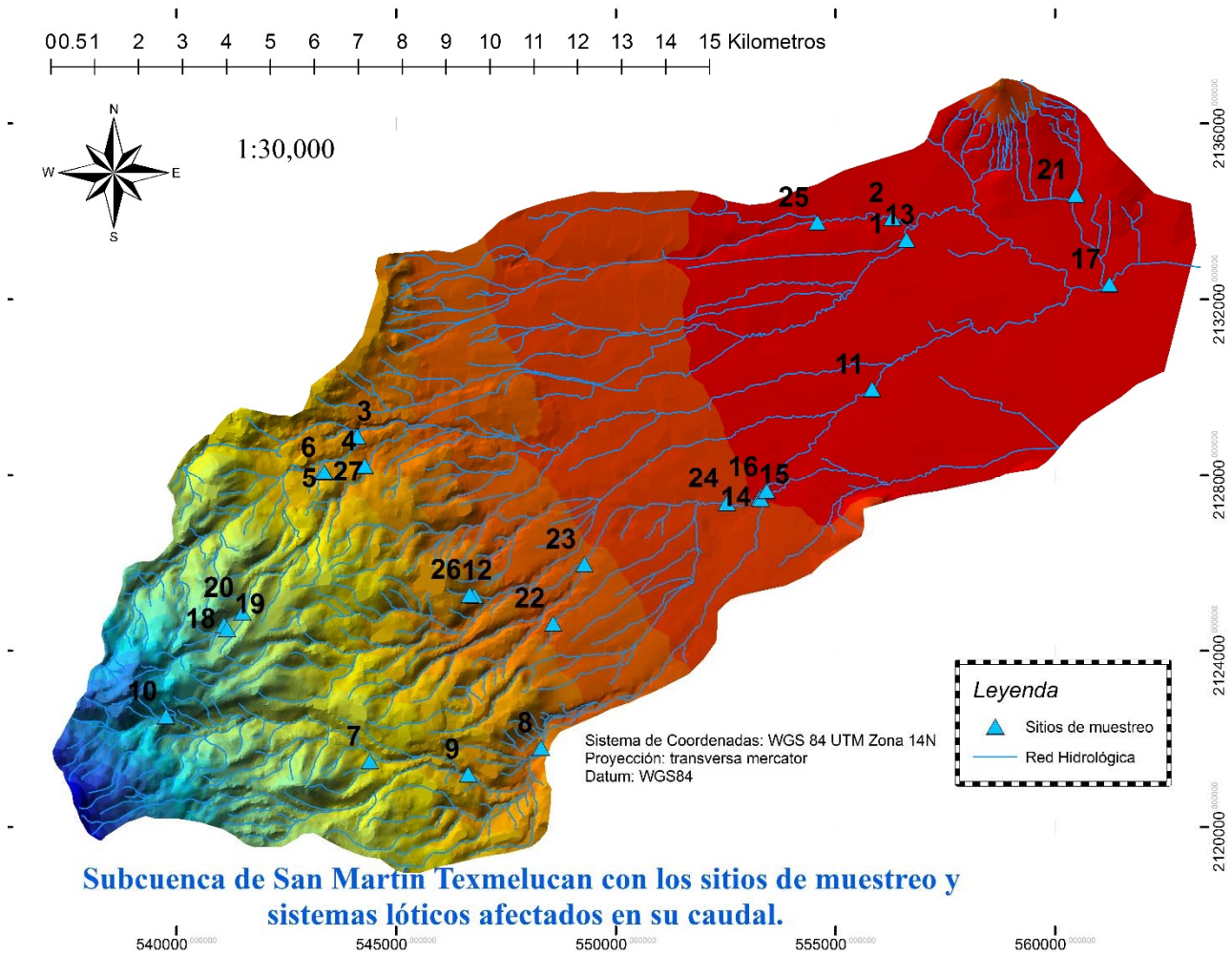


Figura 14. Mapa del relieve en la subcuenca, sitios de muestreo y los ríos secos.

Cuadro 3. Localización de los sitios afectados en la temporalidad del caudal.

Número	Localidad	Intervalo altitudinal	Uso de suelo	Altitud	UTM E	UTM N
21	Seco 1	Subcuenca baja	Agrícola	2274	560474	2134378
22	Seco 2	Subcuenca baja	Agrícola	2670	548574	2124614
23	Seco 3	Subcuenca baja	Agrícola	2580	549286	2125960
24	Seco 4	Subcuenca baja	Urbano	2390	552534	2127354
25	Seco 5	Subcuenca baja	Agrícola	2300*	554588	2133752
26	Seco 6	Subcuenca baja	Forestal	2760*	546671	2125268

Cuadro 4. Localización de los sitios de muestreo y sitios afectados en temporalidad y caudal.

Número	Localidad	Intervalo altitudinal	Uso de Suelo	Altitud (m)	UTM E	UTM N
1	San Rafael Tlanalapan Manantial	Subcuenca baja	Manantial	2265	556296	2133853
2	San Rafael Tlanalapan Río	Subcuenca baja	Urbano	2265	556296	2133853
3	Atzumaco	Subcuenca baja	Forestal	2707	544111	2128882
4	Truchero Xoquititla	Subcuenca alta	Manantial	2821	544287	2128212
5	Palo Obispo Manantial	Subcuenca alta	Manantial	2917	543379	2128047
6	Palo Obispo Río**	Subcuenca alta	Forestal	2897	543364	2128064
7	Axopan	Subcuenca alta	Forestal	3020	544401	2121489
8	Río Cotzalá (Hidroeléctrica)	Subcuenca baja	Agrícola	2713	548297	2121794
9	Río Cotzalá antes represa	Subcuenca alta	Forestal	2861	546640	2121193
10	Pilares	Subcuenca alta	Pastizal montano	4054	539758	2122505
11	San Simón Atzitzintla	Subcuenca baja	Agrícola	2224	555835	2129956
12	Manantial arroba Pozo San Juan Tlale	Subcuenca baja	Manantial	2705	546783	2125246
13	San Rafael Tlanalapan 2	Subcuenca baja	Urbano	2279	556617	2133356
14	San Felipe Teotlalcingo Manantial	Subcuenca baja	Manantial	2386	553273	2127458
15	San Felipe Teotlalcingo Arroyo	Subcuenca baja	Agrícola	2393	553302	2127443
16	San Felipe Teotlalcingo Asilo	Subcuenca baja	Agrícola	2380	553435	2127623
17	San Martín Texmelucan Salida de la cuenca	Subcuenca baja	Urbano	2243	561239	2132346
18	Rincón de Cocoyuco	Subcuenca alta	Forestal	3700	541080	2124580
19	Cocoyuco (Manantial entubado)	Subcuenca alta	Manantial	3745	541152	2124485
20	El Corral	Subcuenca alta	Forestal	3593	541502	2124858

*Datos obtenidos mediante análisis cartográfico de las curvas de nivel de INEGI.

**Sitio que durante los muestreos agua solamente se encontró agua corriente durante la época de lluvias.

Los mapas de uso del suelo y de cambios para la subcuenca se encuentran en las siguientes páginas:

Figura 15. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993).

Figura 16. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999).

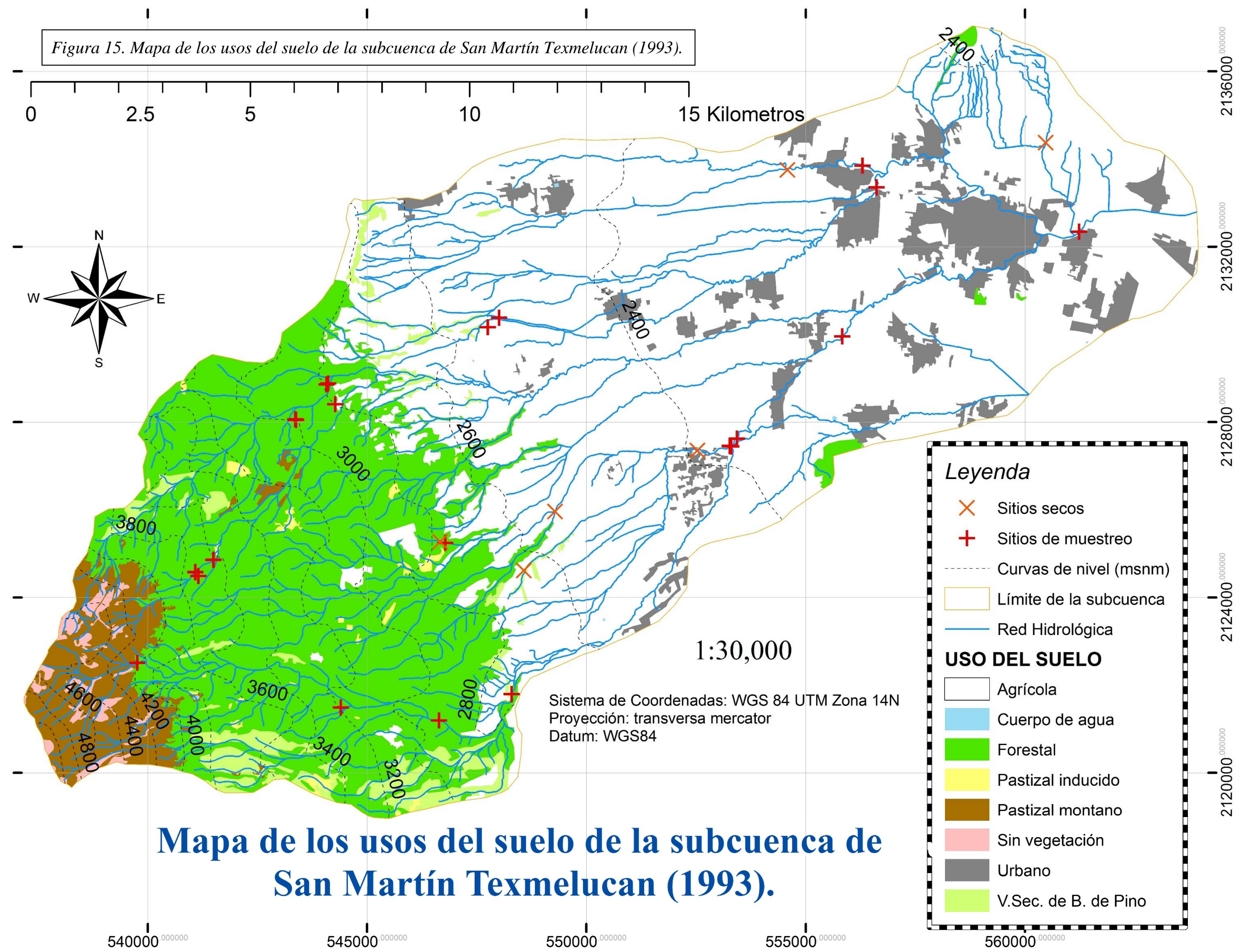
Figura 17. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).

Figura 18. Mapa de cambios en los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-1999).

Figura 19. Mapa de cambios en los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999-2010).

Figura 20. Mapa de cambios en los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-2010).

Figura 15. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993).



Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993).

Figura 16. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999).

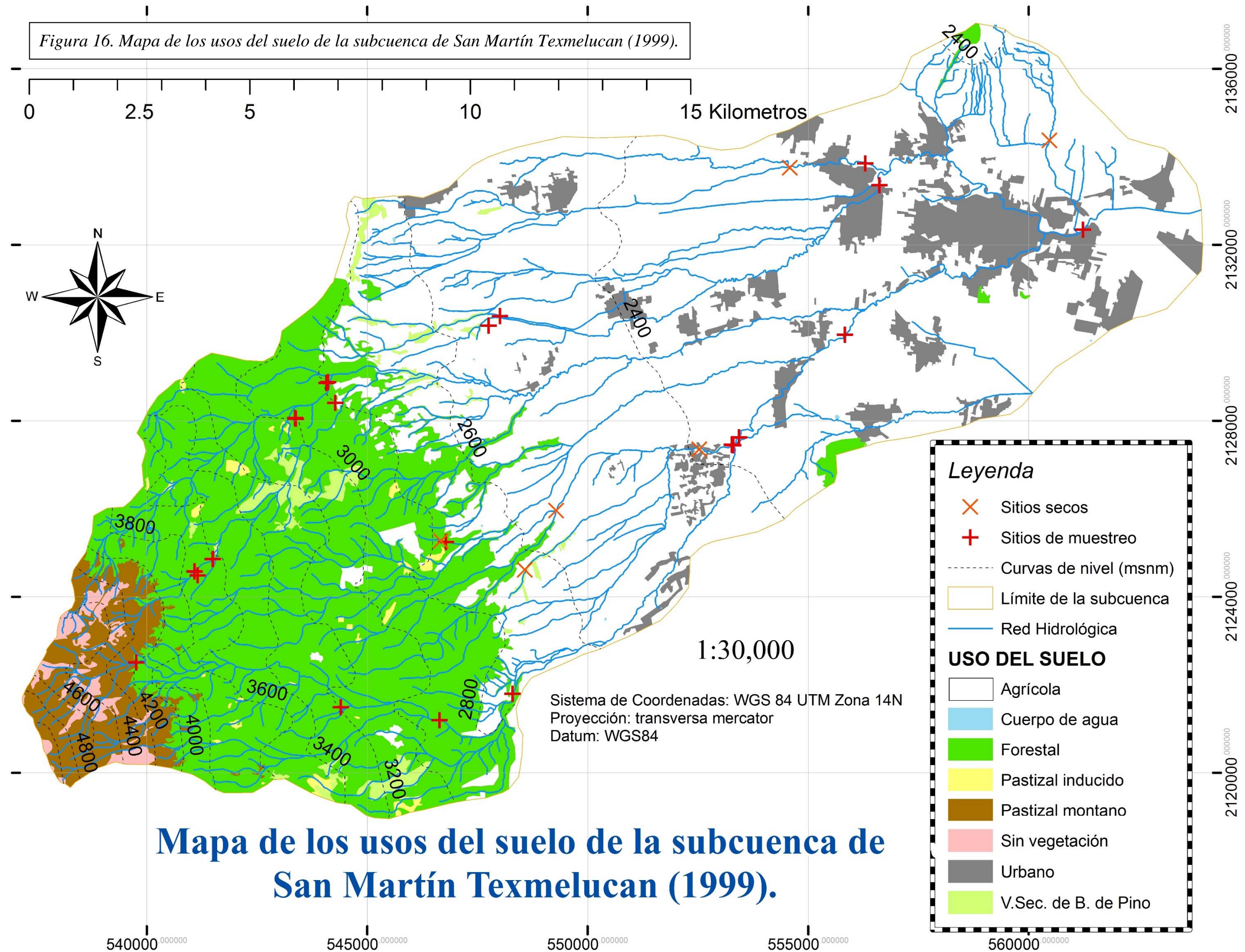
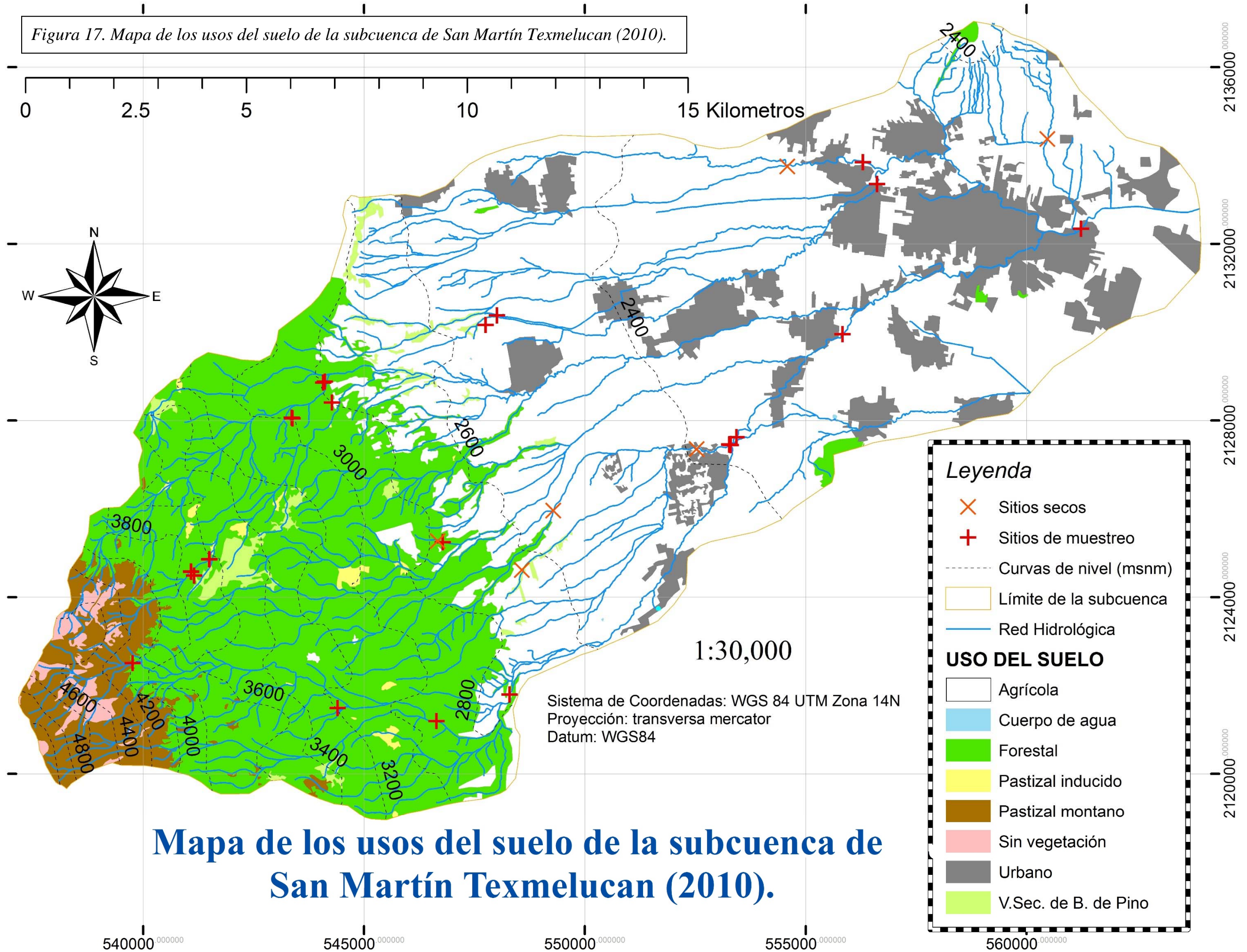
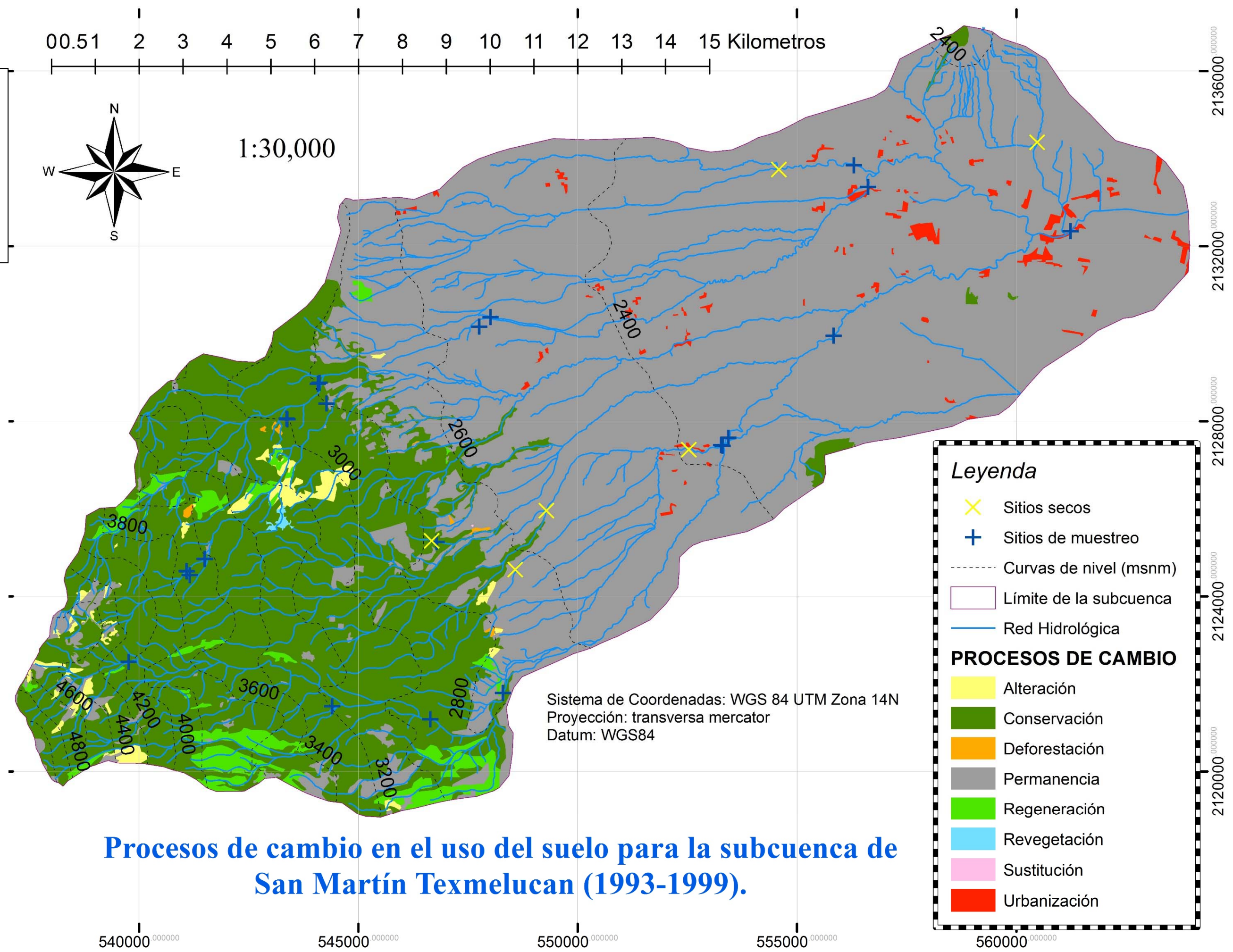


Figura 17. Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).



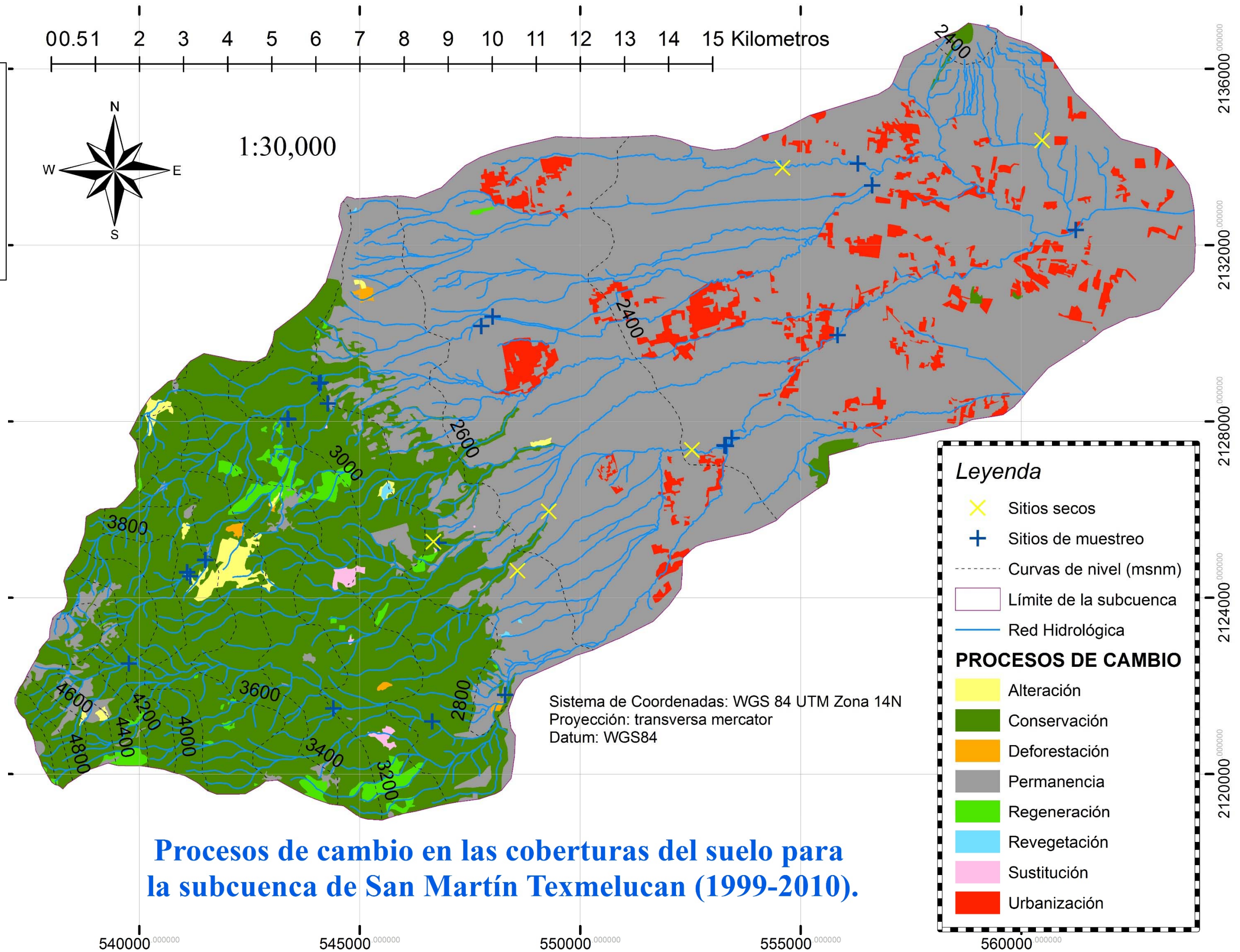
Mapa de los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).

Figura 18.
Mapa de
cambios en
los usos del
suelo de la
subcuenca
de San
Martín



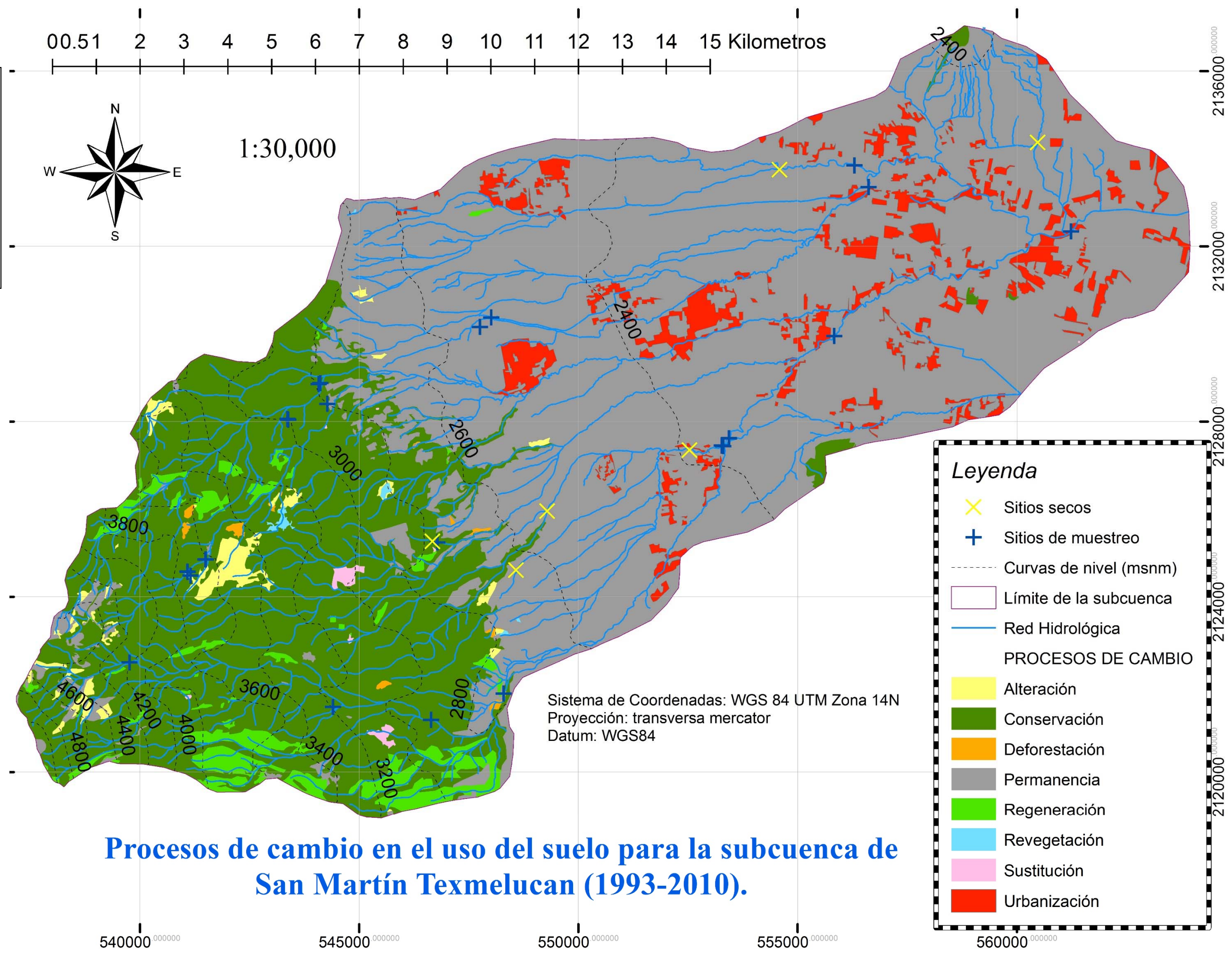
Procesos de cambio en el uso del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-1999).

Figura 19.
 Mapa de cambios en los usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999-2010).



Procesos de cambio en las coberturas del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999-2010).

Figura 20.
 Mapa de
 cambios en
 los usos del
 suelo de la
 subcuenca de
 San Martín
 Texmelucan
 (1993-2010).



Con las herramientas del programa ArcGis 10.3 se calculó el área total de la subcuenca resultando un total de 24,325 hectáreas.

Como resultado de las verificaciones y muestreos en campo los usos del suelo de suelo fueron descritos de la siguiente manera:

Agrícola: En este uso se encontraron las superficies de los cultivos (Figura 21), se encuentran tanto plantas herbáceas como maíz, amaranto, algunos tipos de flores, coliflor, entre otras, así como árboles frutales (pera, manzana, ciruela, entre otros). También se incluyen zonas de invernaderos donde se cultivan principalmente plantas ornamentales como rosas, gladiolas, cempaxúchitl, entre otras. En cuanto a la clasificación cartográfica de esta cobertura se caracterizó por tener colores claros, alineación (lo que indica actividades antropogénicas) y texturas lisas donde hay invernaderos y cultivos herbáceos, y granuladas donde hay árboles frutales (Figura 22).



Figura 21. Ejemplo del uso de suelo agrícola.



Figura 22. Áreas agrícolas en la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).

Cuerpo de agua: Áreas inundadas por agua, originadas por y para actividades humanas, es decir todos son artificiales y destinados a su posterior uso para riego de las zonas agrícolas (Figura 23). En cuanto a su clasificación se observaron polígonos sin alineación, de colores oscuros (azul marino y verde oscuro) y texturas lisas, por lo general se visualizaron como cuerpos redondeados (Figura 24).



Figura 23. Cuerpo de agua en la subcuenca de San Martín Texmelucan (2010).



Figura 24. Cuerpo de agua introducido en una zona forestal.

Forestal: Áreas donde la cobertura vegetal predominante son árboles, en las zonas conservadas dominan especies como *Abies religiosa*, *Pinus ayacahuite*, (principalmente en cañadas), *Pinus hartwegii* y otras especies de pino. En las zonas con menor altitud se encontraron algunas especies de *Quercus* y *Cupressus* (Figura 25). En cuanto a la cartografía de delimitaron polígonos sin alineación (salvo las zonas de reforestación) de colores verdes y textura granulada (Figura 26).



Figura 25. Ortofotografía del 2010 donde se aprecian bosques de la subcuenca de San Martín Texmelucan.



Figura 26. Uso del suelo de tipo forestal.

Pastizal inducido: Se encontró conformado por plantas de la familia POACEAE y algunos arbustos las cuales colonizan superficies que anteriormente eran agrícolas y han dejado de ser productivas para dicha actividad o simplemente abandonadas, también se deforesta la zona de bosque para el desarrollo de actividades pecuarias (Figura 27). En cuanto al aspecto de la clasificación en los mapas es similar a los cultivos, tienen colores claros, con texturas lisas pero no tienen alineación (Figura 28).

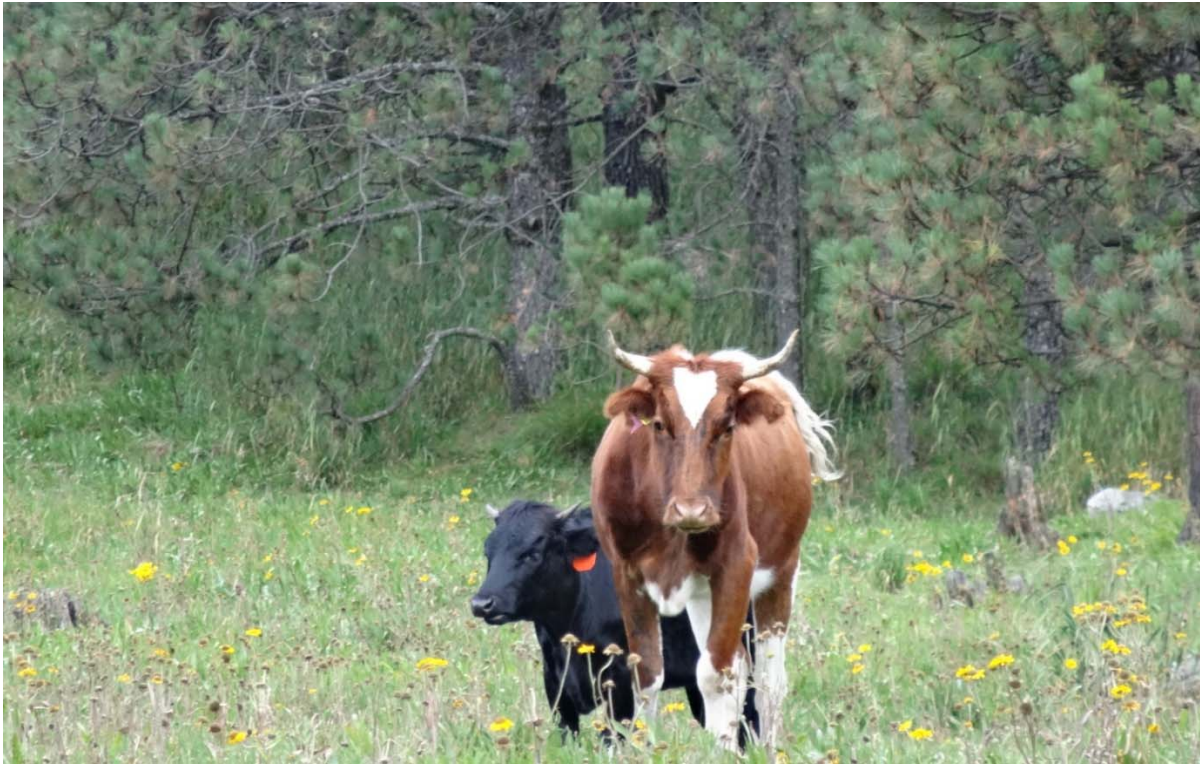


Figura 27. Actividades pecuarias en las zonas de pastizal inducido.



Figura 28. Polígono de pastizal inducido producido por el abandono de tierras agrícolas.

Pastizal montano: Este tipo de vegetación se encontró como vegetación primaria a partir de los 3500 m s. n. m. después de los bosques de *Pinus hartweggi*, dominada por herbáceas con una altura menor a 0.5 m como *Muhlenbergia* sp., *Festuca* sp., algunas otras herbáceas como *Eryngium* sp., *Lupinus* sp. y arbustos de *Juniperus monticola* (Figura 29). En el aspecto cartográfico esta cobertura se caracterizó por no tener alineamiento, una textura intermedia entre rugosa y lisa, así como colores marrones claros (Figura 30).



Figura 29. Pastizal montano a 4100 m s. n. m.



Figura 30. Ortofotografía donde se aprecian el pastizal montano (tonalidades marrones claras) y las áreas sin vegetación aparente (tonalidades grisáceas).

Sin vegetación aparente: En estas áreas no se encontró ningún tipo de vegetación, lo que se pudo observar en campo y en las ortofotografías es la roca desnuda de las partes más altas del volcán Iztaccíhuatl (Figuras 30 y 31). Hablando de su clasificación en ArcGis 10.3 es diferente del pastizal montano solo en el color, el cuál es parecido a un gris oscuro en comparación a las tonalidades claras del pastizal.



Figura 31. Zona sin vegetación aparente donde se aprecia la roca desnuda.

Urbano: Es el uso donde se encontraron los asentamientos humanos, desde los pequeños pueblos hasta la ciudad de San Martín Texmelucan (Figura 32). Los polígonos de esta cobertura mostraron alineamiento, colores grisáceos y se identifican fácilmente, se localizan en las áreas con bajas pendientes (Figura 33).



Figura 32. Asentamientos humanos.



Figura 33. Asentamientos humanos rodeados por zonas de cultivo en una ortofotografía (2010).

Vegetación secundaria de Bosque de Pino (V. Sec. De B. de Pino): Aquí se encontraron pinos jóvenes, arbustos y pastos, este uso acontece cuando las zonas de bosques primarios son deforestadas y se recuperan de las perturbaciones (Figura 34). En el caso de su cartografía es muy parecido a la cobertura forestal, sin embargo los árboles observados son mucho más pequeños y se encuentran bastante separados entre ellos, los cuales se encuentran en una matriz de pastizales y arbustos (Figura 35).



Figura 34. Uso del suelo denominada como vegetación secundaria de bosque de pino.



Figura 35. Zona de vegetación secundaria de bosque de pino rodeada por un bosque primario.

Mediante los análisis de los usos del suelo se encontraron los siguientes resultados (Cuadro 5) que se organizan por las diferentes fechas de análisis:

Cuadro 5: Tipo de Usos del suelo y áreas en la subcuenca de San Martín Texmelucan.

Tipo de Uso del Suelo	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Año de análisis	1993		1999		2010	
Agrícola	13,862.24	56.99	13,673.03	56.21	12,577.87	51.71
Cuerpo de agua	4.92	0.02	3.02	0.01	2.62	0.01
Forestal	6,728.52	27.66	7,100.71	29.19	7,173.40	29.49
Pastizal inducido	91.06	0.37	104.24	0.43	81.21	0.33
Pastizal montano	1,045.66	4.30	932.88	3.83	983.81	4.04
Sin vegetación	165.92	0.68	228.49	0.94	201.96	0.83
Urbano	1,667.30	6.85	1,876.53	7.71	2,947.73	12.12
V. Sec. de B. de Pino	759.58	3.12	406.67	1.67	356.97	1.47
TOTAL	24,325.50	100	24,325.50	100	24,325.50	100

Para la fecha más antigua del análisis cartográfico el uso con mayor extensión es la agricultura seguida de los bosques (Figura 40), los cuáles se encuentran con zonas que se encontraban degradadas por su uso y se observa vegetación secundaria entre la cobertura forestal. En cuanto a los Cuerpos de agua se encuentran en su máxima extensión en los 3 periodos de análisis teniendo casi el doble de extensión que en el 2010 (Cuadro 5).

La cubierta urbana posee casi la mitad de territorio que ocupará 17 años después (Cuadro 5), por lo que la población aportaba menores descargas de agua residual a los ríos y había menor uso del agua de los mismos.

En cuanto al periodo de 1999 es claramente un periodo de transición en el cuál se dio un crecimiento de zonas urbanas (209.23 ha) a partir de 1993 pero en menor proporción en comparación el periodo de 1999-2010 con 1,071.2 ha, como resultado de esto la agricultura disminuyó en 186.24 ha (Cuadro 5). Entre el periodo de 1993-1999 la zona forestal tuvo su mayor recuperación con el aumento de 372.19 ha en contraste con el periodo de 1999-2010 donde sólo incrementó 72.69 ha probablemente a la explotación que se le ha dado recientemente a los bosques (Figuras 36 y 37), así mismo la vegetación secundaria disminuyó para dar paso a bosques primarios, lo que representa una recuperación mayor en el primer periodo de análisis.



Figuras 36 y 37. Degradación de los bosques por actividades pecuarias y de tala.

En cuanto al pastizal montano existieron pérdidas en ambas etapas de análisis, sin embargo durante la primer etapa (112.7 ha) tuvo mayores mermas que en el segundo lapso de análisis (50.93 ha), probablemente porque disminuyeron las actividades pecuarias en la subcuenca, sin embargo no se eliminaron en la zona de Conservación del Parque Nacional, a pesar de que estas acciones impactan directamente al ecosistema arrasando con la vegetación, compactando y acidificando el suelo y aportando contaminantes como fósforo y nitrógeno para la eutrofización de los ríos.

Para el año 2010 el análisis de uso del suelo demostró que la subcuenca presenta un alto grado de antropización, ya que las áreas urbanas y los cultivos ocupan el 63.83% del total (Cuadro 5), por lo que la actividad económica dominante de la zona es la agricultura.

Los bosques ocuparon casi 30% de la subcuenca, aunque fue el segundo uso del suelo con mayor distribución (Figura 42), por lo que se demuestra que la zona tiene un buen potencial para la explotación forestal y su incursión en la sustentabilidad con ayuda de esta actividad, conforme avanzó el tiempo de 1993 al 2010 esa cobertura se fue recuperando y ampliando probablemente como resultado de los cambios en la gestión del Parque Nacional Izta-Popo.

Se siguió la tendencia de pérdida de cuerpos de agua, posiblemente porque las tierras de cultivo ahora poseen sistemas de riego diferentes a los de las épocas anteriores. El pastizal inducido tiene pocas pérdidas en su cobertura, ya que la mayoría de las zonas agrícolas permanecen activas y su cambio en mayor medida es por la urbanización. Los pastizales montanos fue el único tipo de vegetación primaria que sufrió pérdidas en su extensión total de 1993 al 2010, lo que se debe a actividades antrópicas (Figura 38 y 39) que provocan la pérdida de vegetación por ganadería, compactación y acidificación del suelo, además del efecto de variabilidad climática, que ha afectado su distribución.



Figuras 38 y 39. Actividades antrópicas y secuelas de estas a más de 4,000 m n. s. m. en el pastizal montano. Los mayores cambios que se dieron entre los periodos de análisis fueron la ganancia de cobertura urbana por el crecimiento exponencial de la población teniendo como consecuencia la pérdida de las superficies agrícolas pasando de 13,862.24 ha en agricultura para el año de 1993 a 12,577.87 hectáreas en el año 2010, los asentamientos urbanos aumentaron 1,180.43 ha, teniendo 1,667.30 ha en 1993 y 2,947.73 ha en 2010.

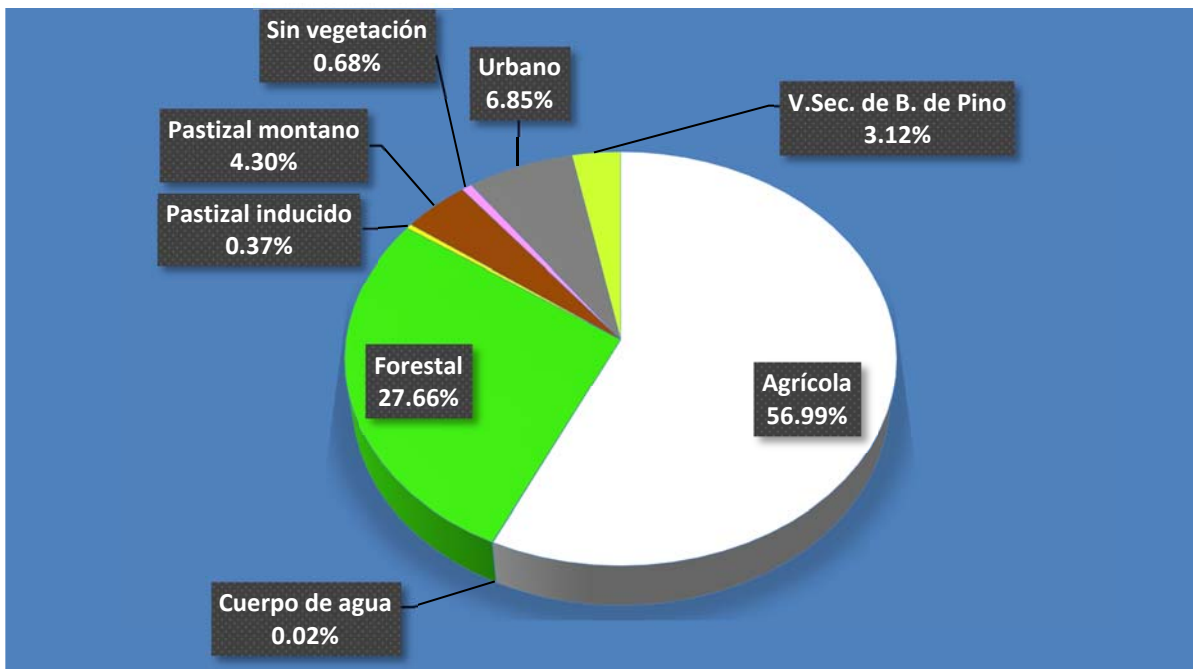


Figura 40. Gráfico de porcentajes para los usos del suelo del año 1993.

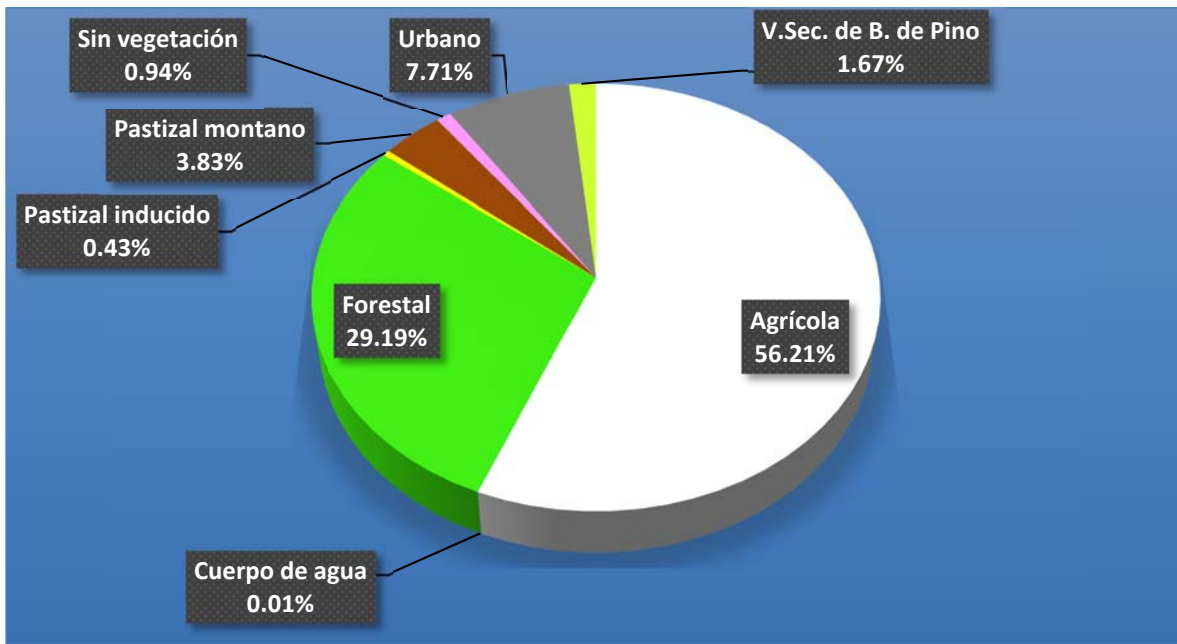


Figura 41. Gráfico de porcentajes para los usos del suelo del año 1999.

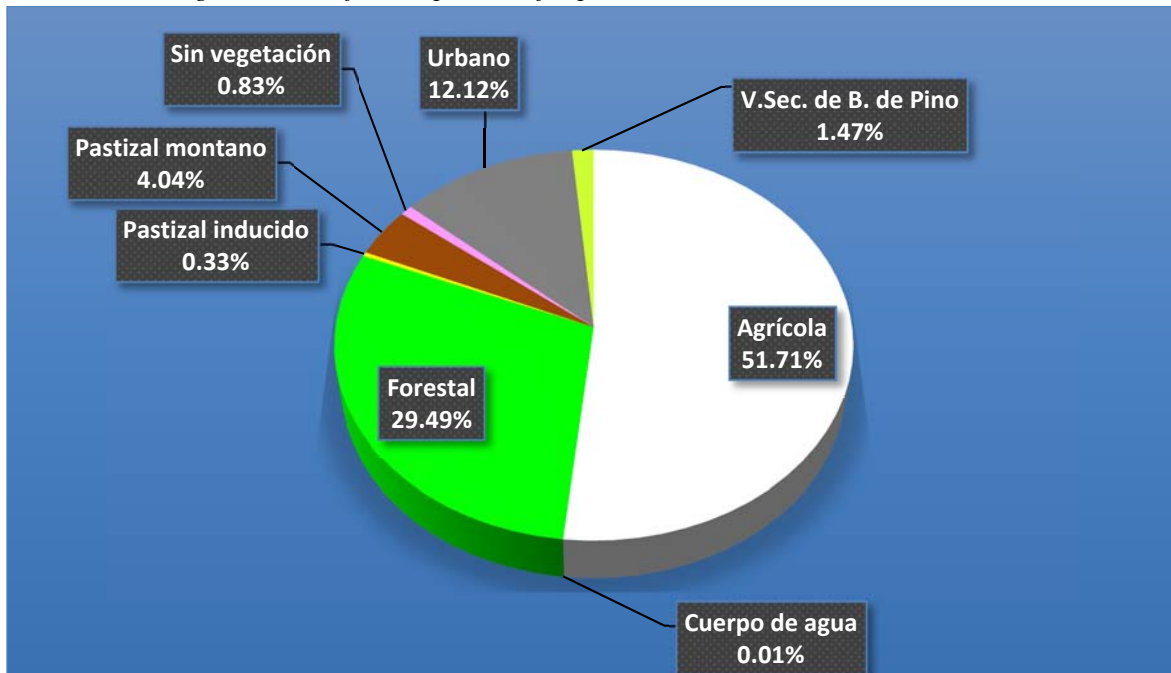


Figura 42. Gráfico de porcentajes para los usos del suelo del año 2010.

Las Tasas de cambio en el uso de suelo se calcularon para proponer escenarios futuros acerca de la evolución en el cambio de la cobertura de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

Siguiendo la ecuación: $r = 1 - \left(1 - \frac{A1-A2}{A1}\right)^{1/t}$ se obtuvieron las tasas entre los años 1993-1999 como también para la época 1999-2010 y 1993-2010 para conocer el comportamiento de los usos del suelo en dichos periodos de tiempo (Figuras 43, 44 y 45); los valores positivos representan pérdida o disminución en las coberturas y los negativos ganancias en las diversas cubiertas del suelo. Para

calcular las proyecciones de escenarios futuros (años 2020 y 2040) se despejó la ecuación anteriormente usada para obtener: $A_2 = A_1(1 - r)^t$, para dicha ecuación se usó la tasa del periodo 1993-2010.

En cuanto a las tasas de cambio, las que sobresalen en cuanto a pérdidas en el periodo de análisis 1993-2010 son los cuerpos de agua y la vegetación secundaria de bosque de pino, debido al menor uso de los cuerpos de agua para riego por la implementación de sistemas de riego en la subcuenca, estos dos usos tienen tasas altas ya que sus extensiones son pequeñas y cualquier cambio tiene una gran repercusión en las tasas de cambio. Así mismo el desuso de los bosques ha permitido su recuperación y la vegetación secundaria ha pasado a bosques primarios, las áreas urbanas destacan por su tasa de cambio gracias al crecimiento exponencial de los poblados (Figura 43). Dichos cambios se pueden apreciar claramente en los mapas de coberturas (Figuras 15, 16 y 17).

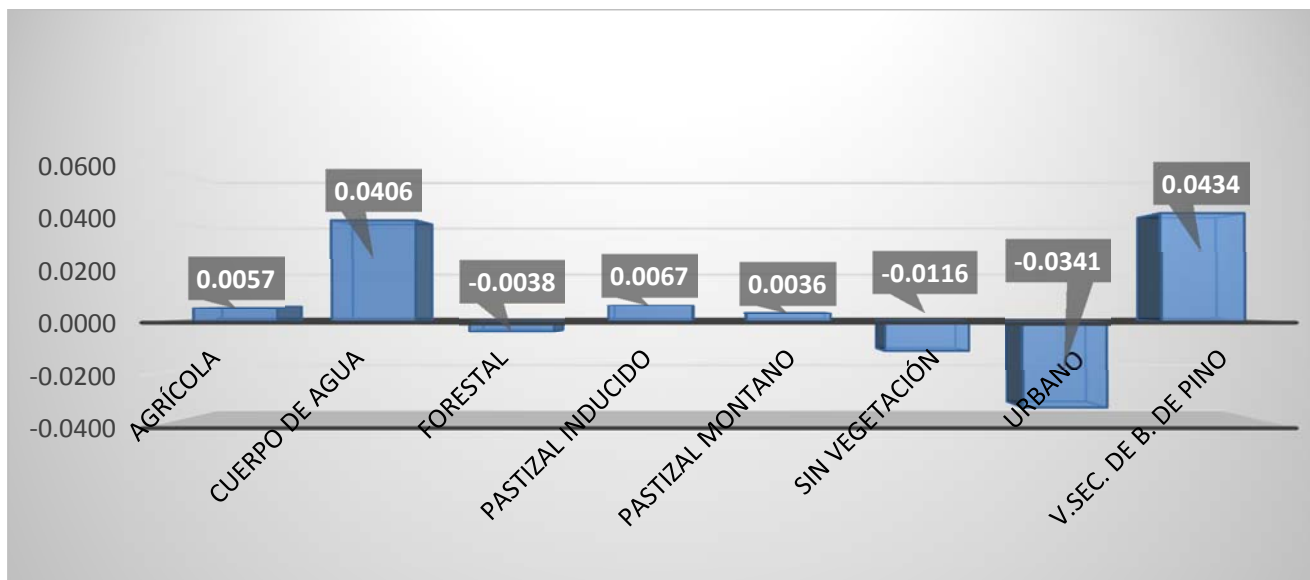


Figura 43. Tasas de Cambio en los usos del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan para el periodo 1993-2010.

Durante el primer periodo de análisis (Figura 44) los cuerpos de agua y la vegetación secundaria de bosque de pino siguen siendo las que reportan mayores tasas seguidas del pastizal montano; sin embargo, el cambio que destaca en este periodo es la tasa de cambio con ganancia en la cobertura sin vegetación aparente, la cual probablemente sucede por un mayor uso de esta cobertura, lo que muestra que la regulación y manejo del PNIP es mejorable.

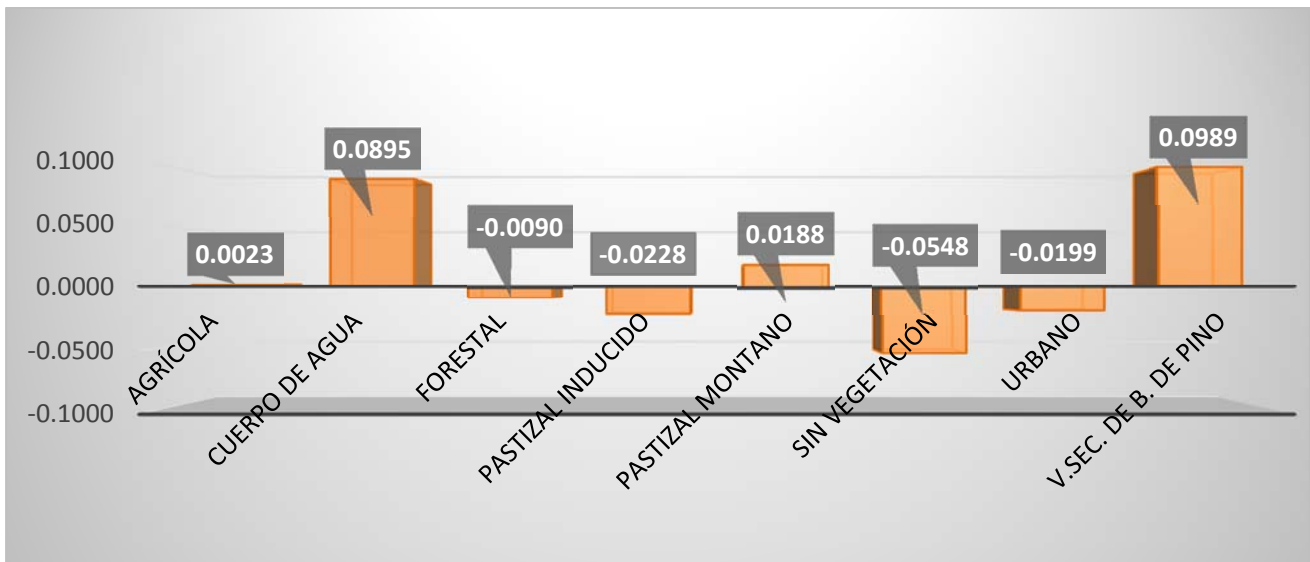


Figura 44. Tasas de Cambio en los usos del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan para el periodo 1993-1999.

En cuanto al segundo periodo (1999-2010) el uso con mayor tasa en cuanto a pérdida fue el pastizal inducido ya que es un uso poco extenso en la subcuenca y por lo tanto cualquier cambio altera fácilmente la tasa, en este periodo la tasa de las coberturas sin vegetación aparente y pastizal montano son diferentes con respecto al periodo 1993-2010, en donde se gana pastizal y se reduce el área sin vegetación lo que refleja la recuperación del pastizal gracias a la conservación de este (Figura 45).

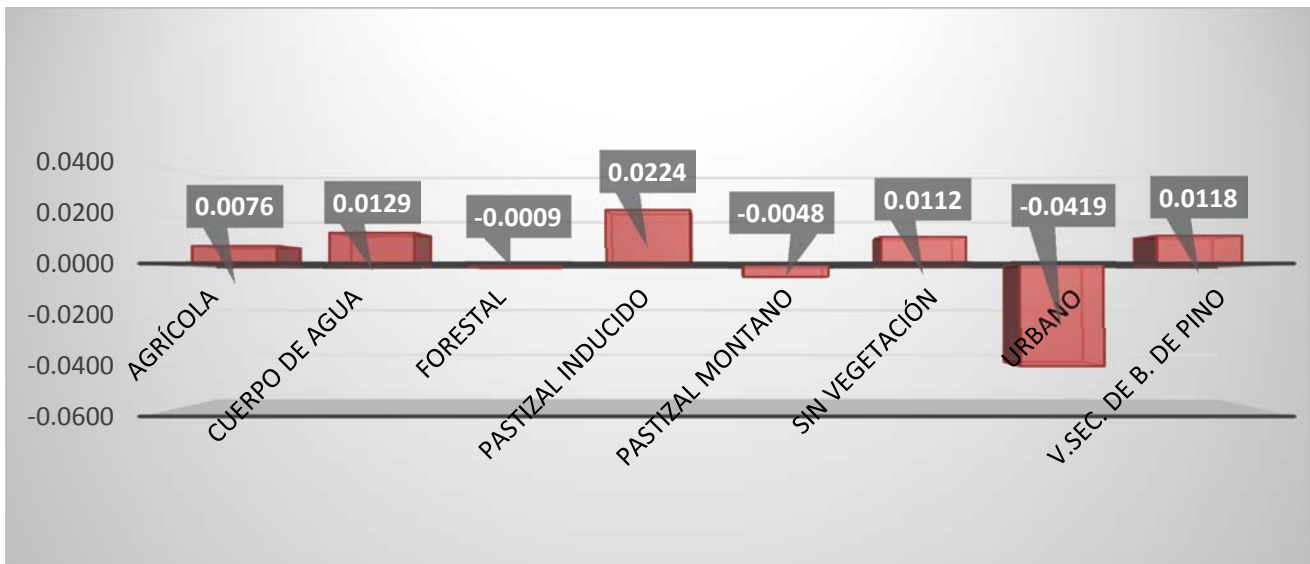


Figura 45. Tasas de Cambio en los usos del suelo para la subcuenca de San Martín Texmelucan para el periodo 1999-2010.

En cuanto a las proyecciones de escenarios futuros se obtuvieron los resultados del Cuadro 6, en los cuáles se siguieron las tendencias de pérdida de tierras de cultivo y ganancias de zonas urbanas, la zona forestal crece al igual que el área sin vegetación, mientras que siguen las pérdidas de las zonas de pastizales inducidos y montanos, como también la vegetación secundaria de bosque de pino. Este

análisis supone la conservación y recuperación de la zona forestal gracias al manejo y gestión del PNIP, sin embargo solo es en zona forestal, ya que el pastizal montano que es una importante zona para la captación de agua y formación de arroyos, ríos y hábitat de especies prioritarias como *Romerolagus diazi* es reducida por la presencia antrópica, mientras que en la subcuenca baja la urbanización cada vez aumenta más y la agricultura disminuye como consecuencia (Cuadro 6). Esto continuará con el mismo manejo y uso de los recursos en la subcuenca, también con similares tasas de crecimiento poblacional.

Cuadro 6. Áreas de los diversos usos del suelo en 3 épocas y prospecciones para los años 2020 y 2040.

Uso del suelo	Hectáreas (1993)	Hectáreas (1999)	Hectáreas (2010)	Prospección para el 2020 (ha)	Prospección para el 2040 (ha)
Agrícola	13,862.24	13,673.03	12,577.87	11,878.68	11,218.36
Cuerpo de agua	4.92	3.02	2.62	1.73	1.14
Forestal	6,728.52	7,100.71	7,173.40	7,448.72	7,734.60
Pastizal inducido	91.06	104.24	81.21	75.92	70.98
Pastizal montano	1,045.66	932.88	983.81	949.15	915.71
Sin vegetación	165.92	228.49	201.96	226.72	254.51
Urbano	1,667.30	1,876.53	2,947.73	4,121.54	5,762.77
V. Sec. de B. de Pino	759.58	406.67	356.97	228.94	146.83

En cuanto a los procesos de cambio de usos del suelo durante el periodo de 1993 a 2010 se obtuvo lo siguiente:

En la Figura 46 se puede observar que la mayor parte de la subcuenca perdura con los mismos usos (conservación y permanencia) con un total de 21,992 ha, en cuanto a los cambios positivos a lo largo de todo el periodo de análisis (regeneración y revegetación) se obtuvieron 719 ha, superficie que es menor a los cambios negativos (alteración, deforestación y urbanización) con 1,571.38 ha principalmente se ve afectada esta cifra por el elevado incremento en poblados los cuales ejercen más presión a los recursos naturales e hídricos.

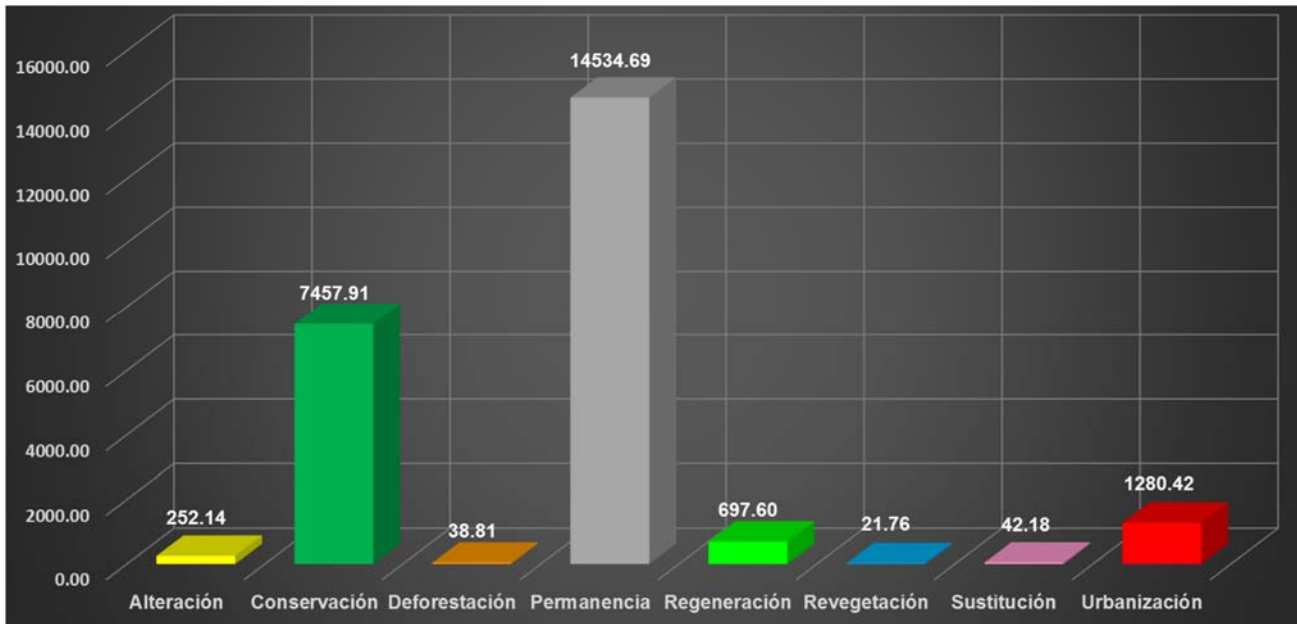


Figura 46. Gráfico donde se aprecian las áreas de los diversos procesos de cambio en la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-2010).

En la primera fase de análisis la subcuenca cambia menos que en la segunda fase, lo cual es lógico debido a que en la primera etapa de análisis hay una diferencia de 6 años y de 11 años en la segunda etapa. Durante el periodo 1993-1999 la regeneración fue el cambio más significativo en cuanto al progreso en coberturas naturales; sin embargo, el segundo y tercer cambio fueron negativos (alteración y urbanización) sin embargo en este periodo se dió el menor aumento en la cobertura urbana (Figura 47).

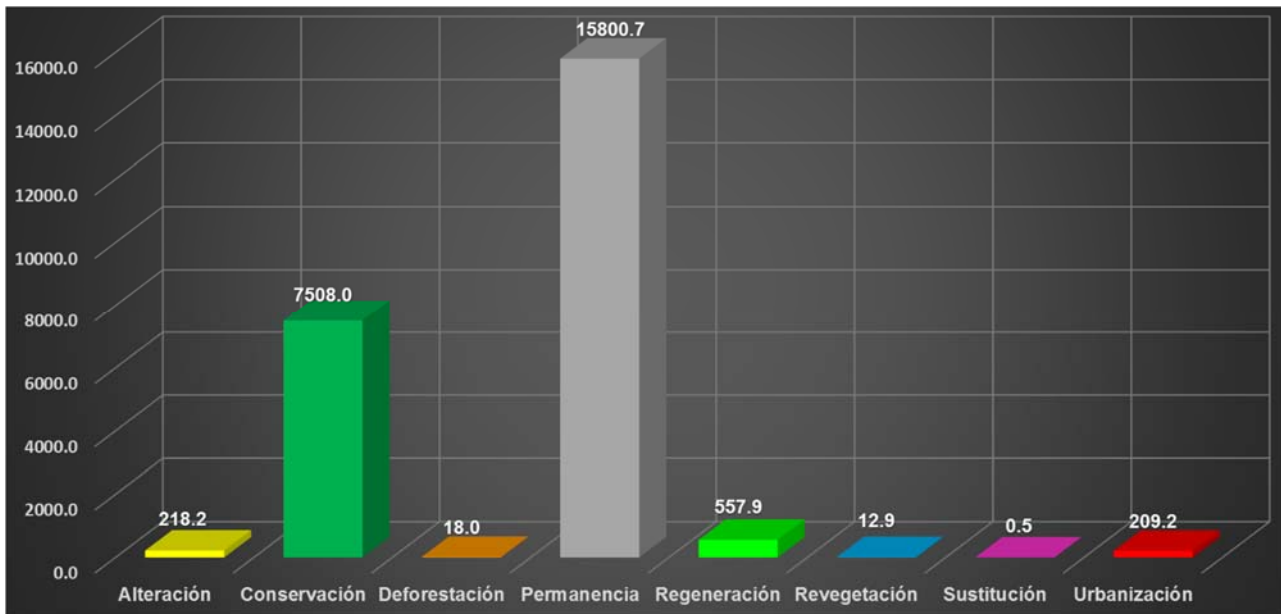


Figura 47. Gráfico donde se aprecian las áreas de los diversos procesos de cambio en la subcuenca de San Martín Texmelucan (1993-1999).

En cuanto al segundo periodo (1999-2010) se dio el aumento más significativo en la urbanización y deforestación, en cambio procesos positivos como la regeneración y revegetación muestran progresos menores en comparativa con el primer periodo de análisis (Figura 48). Por lo tanto se deduce que el incremento en la población de la subcuenca limita la regeneración de los ecosistemas ejerciendo presión sobre los recursos naturales.

Así mismo, si se continúa con el crecimiento poblacional que ha sufrido en los últimos años, también se espera aumentará el área de tierras de cultivo y por lo tanto el uso de plaguicidas y fertilizantes por lo que el aporte de estos a los ecosistemas ribereños crecería y empeoraría la calidad del agua (Stephenson & Solomon, 2013).

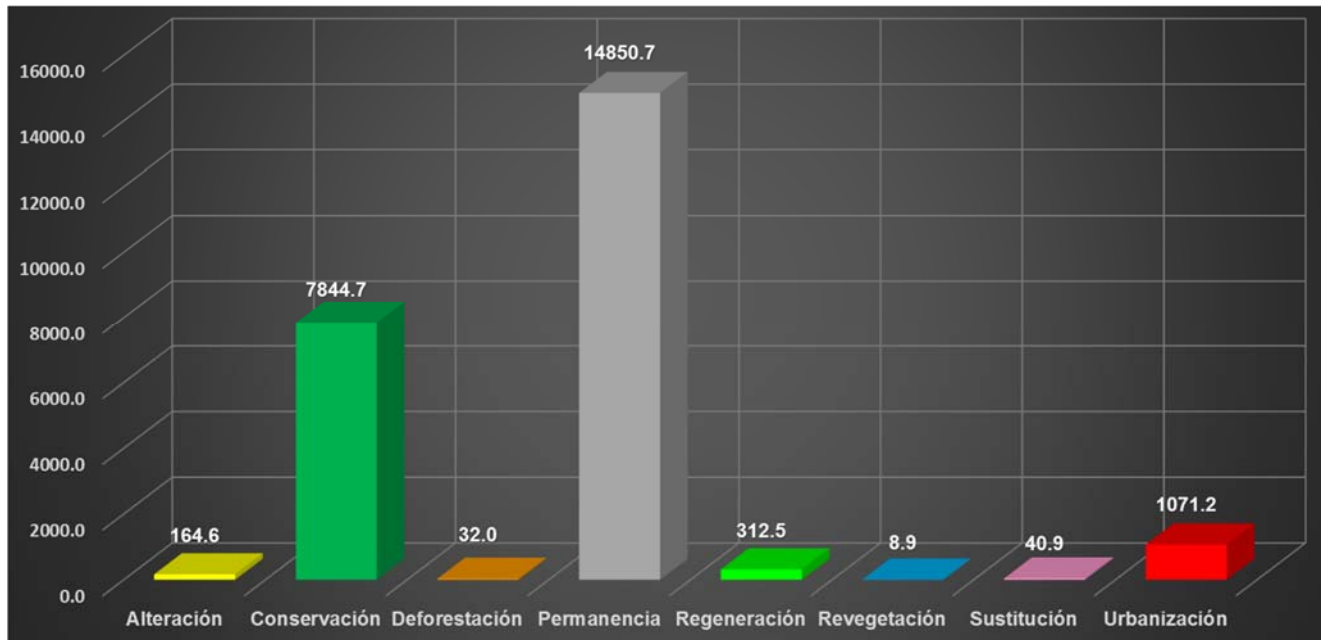


Figura 48. Gráfico donde se aprecian las áreas de los diversos procesos de cambio en la subcuenca de San Martín Texmelucan (1999-2010).

Como resultado de las verificaciones en campo se encontraron un total de 6 sitios en donde los ríos se encuentran secos en su totalidad y un sitio más en donde solo se encontró agua corriente en la época de lluvias en comparación con la temporada de estiaje, sin embargo INEGI considera a todos los afluentes como permanentes.

Usando el Simulador de Flujos de agua y Cuencas hidrológicas (SIATL) versión 3.1 para la obtención de estadísticas con respecto al área de escurrimiento de flujos (área de escurrimiento) corrientes arriba de los sitios afectados en la interrupción de su flujo ayudó para la elaboración de la siguiente tabla (Cuadro 7):

Cuadro 7. Población y detalles de viviendas pertenecientes a las áreas de escurrimiento afectadas de sistemas ribereños actualmente secos (el punto 22 y 23 se encuentran corriente arriba con respecto al punto 24 por lo que no se toman en cuenta para la suma total).

Sitio	Población en el área de escurrimiento	Número de viviendas particulares	Número de viviendas habitadas que no disponen de agua entubada.	Número de viviendas habitadas que no disponen de drenaje	Área drenada (ha).
22	26	11	0	3	204
23	0	0	0	0	830
21	406	145	104	73	281
24	7,607	2,039	21	249	2,320
25	26,057	6,712	226	209	2,421
26	0	0	0	0	65
Total	34,070	8,896	351	531	5,087

El sitio 21 se muestra en la Figura 49, según la información de INEGI debería de ser un afluente permanente pero en los recorridos de campo se encontró en su totalidad seco, debido a que las áreas originalmente cubiertas por bosques que ocupaban la región han sido deforestadas desde el parteaguas de la subcuenca y convertidas a zonas de cultivos, así mismo se construyeron caminos y puentes que interrumpen totalmente el recorrido del agua.



Figura 49. Sitio 21 (seco 1).

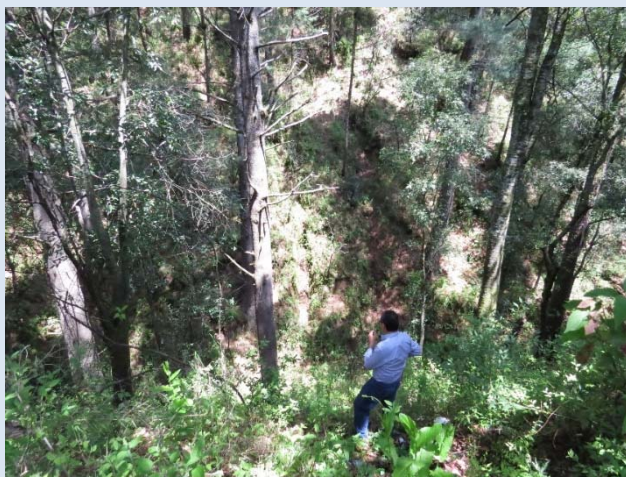


Figura 50. Sitio 22 (seco 2).

El sitio 22 (Figura 50), según la información de INEGI es un afluente permanente sin embargo con los recorridos de campo se encontró que la información es incorrecta, ya que se encuentra en su totalidad seco, debido a que las áreas aledañas originalmente cubiertas por bosques que ocupaban la región han sido convertidas a zonas agrícolas, por lo que se han instalado sistemas de riego en la región que utilizan el agua de zonas con mayor altitud, por lo que se impide el flujo de agua cuenca abajo.

El sitio 23 (Figura 51), de acuerdo con INEGI es un afluente permanente, con los recorridos de campo se desmiente esta información, ya que la ribera ha sido convertida en su totalidad a zonas agrícolas.



Figura 51. Sitio 23 (seco 3).



Figura 52. Sitio 24 (seco 4).

Debido al seguimiento de los sitios 22 y 23 se verificó la confluencia de estos que se da cuenca abajo en el Sitio 24 (Figura 52) donde se encontró el sitio seco en su totalidad e inclusive con caballos pastando y zonas aledañas con casas habitación donde antes se encontraba la vegetación ribereña. La información de INEGI es incorrecta, ya que según esta, el sitio es un afluente permanente. Río arriba de 1994 a 2010 se presentaron procesos de deforestación, urbanización y desvío para usos antrópicos, lo cual explica porque ha sido alterado este caudal hasta el punto de no llevar agua.



Figura 53. Sitio 25 (seco 5).



Figura 54. Zonas próximas al Sitio 25 (seco 5).

El sistema lótico correspondiente al sitio de muestreo 25 (Figura 53) con base en la información de INEGI también es un río permanente, sin embargo cuenca arriba las zonas antes ocupadas por superficies agrícolas (Figura 54), han sido ocupadas por invernaderos y cultivos con sistemas de riego, además de ser un área donde se registró la mayor urbanización, como se puede observar en el mapa de cambios de 1994 al 2010.



Figura 55. Sitio 26 (seco 6).



Figura 56. Sitio 12.

INEGI reporta al sitio 26 (Figura 55) como un afluente permanente, sin embargo el agua corriente del lugar ha sido entubada (Figura 56) por una obra de infraestructura del estado de Puebla durante el régimen del gobernador Mario Marín Torres en el 2010, mediante la cual se provee con este flujo a los sistemas de riego y con estos a las zonas agrícolas de la zona.



Figura 57. Sitio 6 Palo Obispo Río.



Figura 58. Sitio 27 (seco en temporada de estiaje).

El sitio 6 (Figura 57) denominado como Palo Obispo Río, es el mismo que el sitio 27 (Figura 58), el cuál a pesar de que se encuentra como flujo permanente según INEGI, fue encontrado seco en la temporada de estiaje o de secas. Durante el muestreo realizado en la temporada de secas se encontró que parte del bosque había sido talado (Figura 59), por lo que se le atribuye a esta actividad la intermitencia de la corriente. Dichas alteraciones no se encontraron en los mapas debido a que son cambios recientes.



Figura 59. Pinus ayacahuite y Abies religiosa talados en el sitio 27.

La subcuenca se dividió en dos intervalos altitudinales en donde se engloban los 20 sitios de muestreo:

- a) 2250-2850 m s. n. m.
- b) 2850-3800 m s. n. m.

De los sitios de muestreo, 11 pertenecen a la subcuenca baja y 9 a la subcuenca alta. La comparación entre los dos rangos altitudinales se realizó con la prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) por comparación de medianas.

En la comparación de medianas de nitrógeno en forma de nitratos se encontró que el valor-P es de $1.60226E-9$, para nitritos es $1.02069E-7$ y de amonio el valor-P es 0.00147739 (todos menores a 0.05), lo que indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los 2 intervalos altitudinales para nitratos, nitritos y amonio con un nivel de confianza del 95%, si se observan las gráficas (Figuras 60, 61 y 62) se distingue claramente que en la zona de la subcuenca baja la concentración de nitrógeno en sus diferentes formas es mayor a la subcuenca alta, debido a que en esa zona predominan las actividades antrópicas con descargas de aguas residuales municipales y áreas agrícolas, en seis sitios de la subcuenca baja (Atzumaco, San Simón Atzintzintla, Río Cotzalá (hidroeléctrica), San Rafael Tlanalapan manantial, San Rafael Tlanalapan río y San Rafael Tlanalapan

2 hay presencia de *Alnus* sp. los cuales están identificados como fuentes importantes de nitrógeno en los ríos, debido a que las hojas de *Alnus* contienen cuatro veces más nitrógeno que otras especies deciduas (Wetzel, 2001), esto debido a que establecen una asociación con bacterias fijadoras de N_2 , esto provoca que el nitrógeno fijado entre en el sistema acuático a través de la lixiviación o cuando las hojas caen (Dodds & Whiles, 2010), de tal manera que hay un contribución importante de nitrógeno al río, cabe mencionar que el género *Alnus* es considerado un indicador de perturbación ambiental, esto explica que las diferencias de concentraciones de nitrógeno además de ser causadas por descargas de aguas de uso doméstico, también son causadas por el deterioro de la franja ribereña, en la cual se establecen especies que afectan de manera significativa la concentración de materia orgánica a los ríos. Los sitios que se consideran contaminados por nitratos con concentraciones mayores a 10 mg/L (Wetzel, 1981) solo se presentaron en la época de secas ya que es conocido que en dicha temporada los aportes de nitratos aumentan, además del efecto de concentración por la disminución del caudal (Hornung & Reynolds, 1995) (Figuras 63 y 64). La concentración de nitrato en los ríos está ligada al caudal de los ríos, los niveles son bajos durante el verano, incluso añadiendo fertilizantes, debido a que las plantas que crecen utilizan el nitrógeno tan pronto como esté disponible. Los plaguicidas utilizados en zonas de cultivo pueden entrar en los cuerpos de agua en forma de complejos suelo-plaguicida formados por erosión de los suelos, la cual puede ser eólica o hídrica, los excesos de fertilizantes y plaguicidas pueden estar disueltos en las aguas superficiales de escorrentía aumentando concentraciones tanto de nitrógeno como de Fósforo en los sistemas lóticos (Stephenson & Solomon, 2013). La parte alta de la subcuenca posee valores de amonio menores a 5mg/L por lo que se consideran como aguas superficiales no contaminadas (Wetzel, 1981), en contraste con los valores de la subcuenca baja que llegan hasta 21 mg/L.

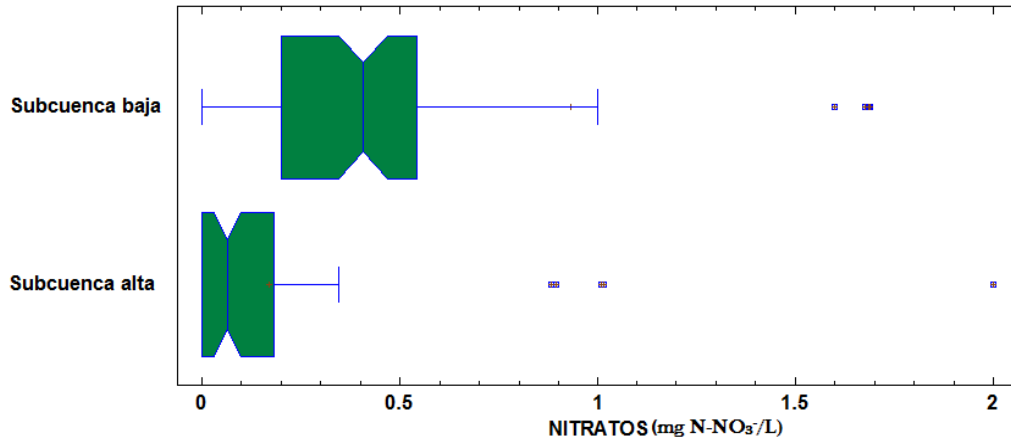


Figura 60. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitratos en la subcuenca baja y alta. En el gráfico faltan 3 valores atípicos, los cuales corresponden a 3 sitios donde se muestreó en la temporada de secas y que resultaron con mayor concentración de nitratos (Figuras 63 y 64).

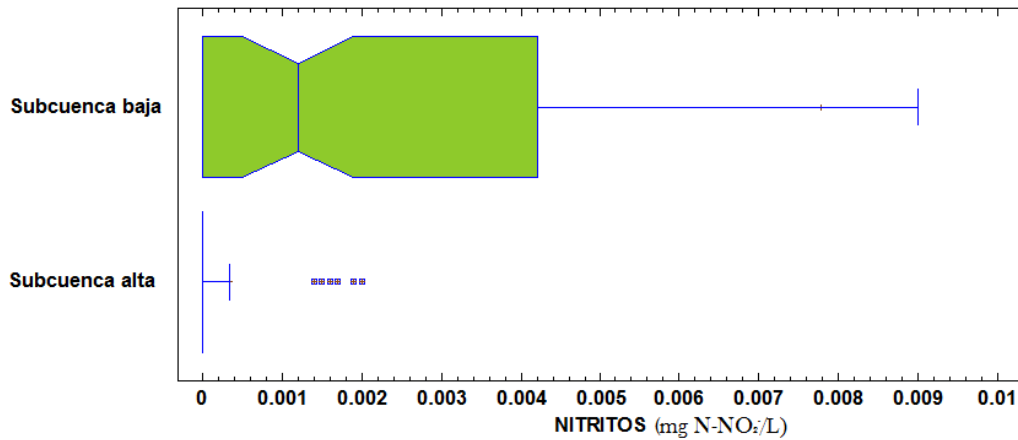


Figura 61. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitritos en la subcuenca baja y alta. Falta un valor atípico que corresponde al sitio más contaminado (San Rafael Tlanalalpa río).

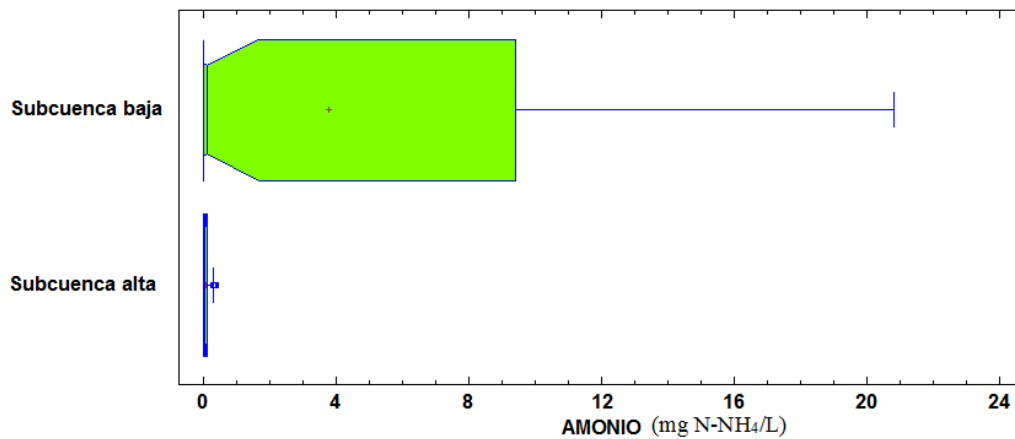


Figura 62. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de amonio en la subcuenca baja y alta.



Figuras 63 y 64. Sitios con mayor concentración de nitratos que se encuentran en la subcuenca baja.

En la comparación de medianas para las concentraciones de fósforo total y ortofosfatos (valores P de $9.67893E-7$, y 0.00000283135 respectivamente, con un nivel de confianza del 95%) se encontraron diferencias significativas entre la subcuenca baja y la alta.

Las concentraciones de fósforo total y ortofosfatos son mayores en la subcuenca baja debido al uso de jabones y detergentes que una vez utilizados son descargados a los sistemas lóticos ya que esta zona es donde se encuentran los asentamientos urbanos. Así mismo debido a la abundancia de zonas agrícolas y al uso de fertilizantes y plaguicidas las concentraciones de fósforo son mayores en la subcuenca baja como se observa en las figuras 65 y 66.

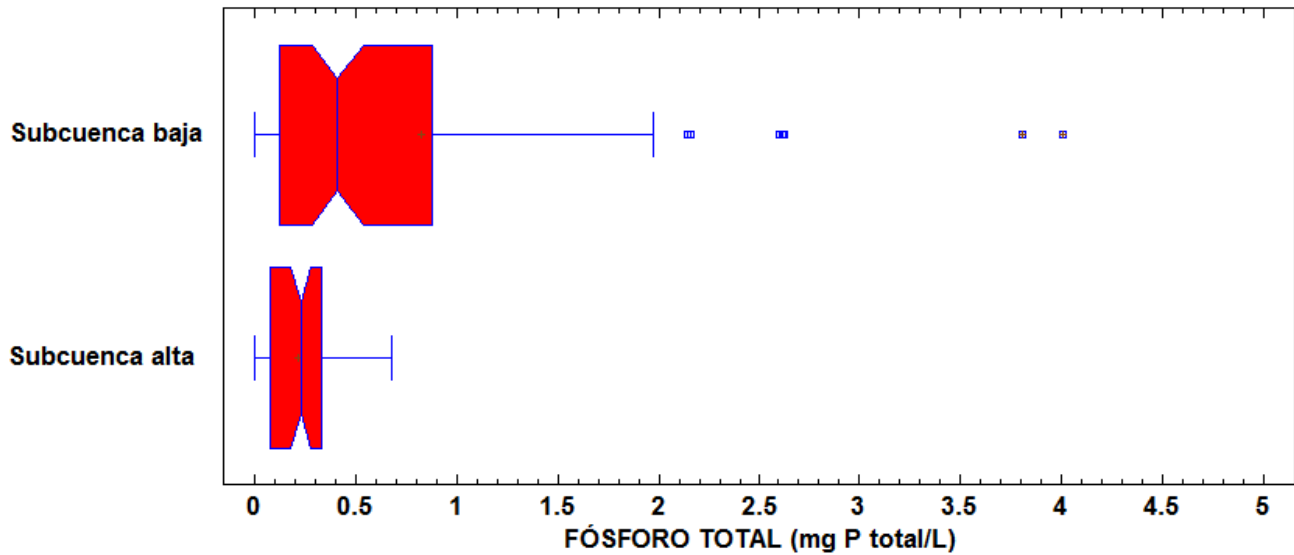


Figura 65. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de fósforo total en la subcuenca baja y alta.

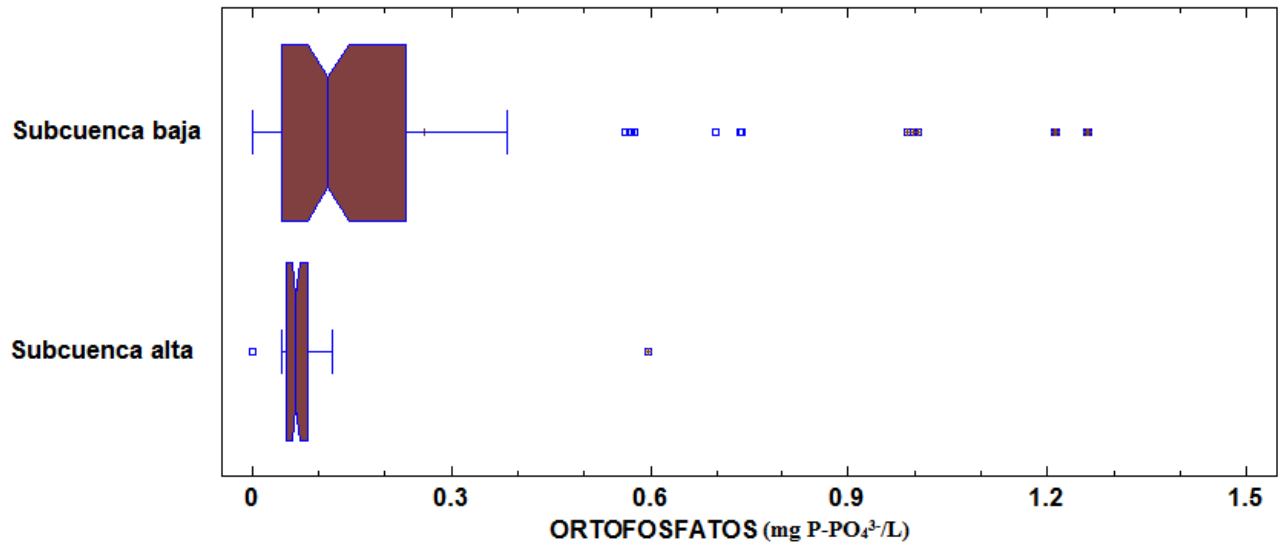


Figura 66. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de ortofosfatos en la subcuenca baja y alta.

En la prueba W de Mann Whitney (Wilcoxon) para DBO₅ se encontró que el valor-P es de 0.0225195 y para DQO de 0.0037981 por lo que hay diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de las demandas biológica y química de oxígeno con un nivel de confianza del 95%.

En cuanto a los niveles de DBO₅, en la subcuenca alta se encuentran aguas no contaminadas y con poca materia orgánica biodegradable por lo que se consideran sistemas lóticos con buena y excelente calidad en cuanto a DBO₅, para la parte baja los aportes de contaminantes orgánicos biodegradables aumentan y se consideran aguas con calidad excelente, buena y aceptable ya que en la parte más baja se presentan indicios de contaminación, sin embargo son aguas que cuentan con la capacidad de autodepuración (CONAGUA, 2015). La mediana de las concentraciones de DQO en la subcuenca alta se encuentra con una calidad aceptable, mientras que en la baja la mediana está en la categoría de contaminada, llegando a sitios en donde se encuentra fuertemente contaminada en sitios con concentraciones mayores a 200 mg O₂/L (CONAGUA, 2015).

La demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días va aumentando conforme disminuye la altitud y las actividades antrópicas se incrementan, en la subcuenca alta existen aportes de contaminantes, sin embargo los cuerpos de agua poseen capacidad de autodepuración ya que los ecosistemas ribereños no se encuentran devastados como en la subcuenca baja, lo que ocasiona que esta materia orgánica biodegradable no sea aprovechada por los organismos que originalmente se encontraban en estos ecosistemas, además del gran aporte de contaminantes por las zonas agrícolas y urbanas.

En cuanto a la demanda química de oxígeno la cual engloba a la DBO₅ y a la materia orgánica no biodegradable por lo que se presentan los contaminantes biodegradables y aquellos que se incorporan a las cadenas tróficas por no ser biodegradables, estos contaminantes se concentran en los seres vivos y sus tejidos como el DDT que podría haber sido usado en el pasado en las áreas de cultivos donde son arrastrados poco a poco por escorrentía hacia los sistemas lóticos.

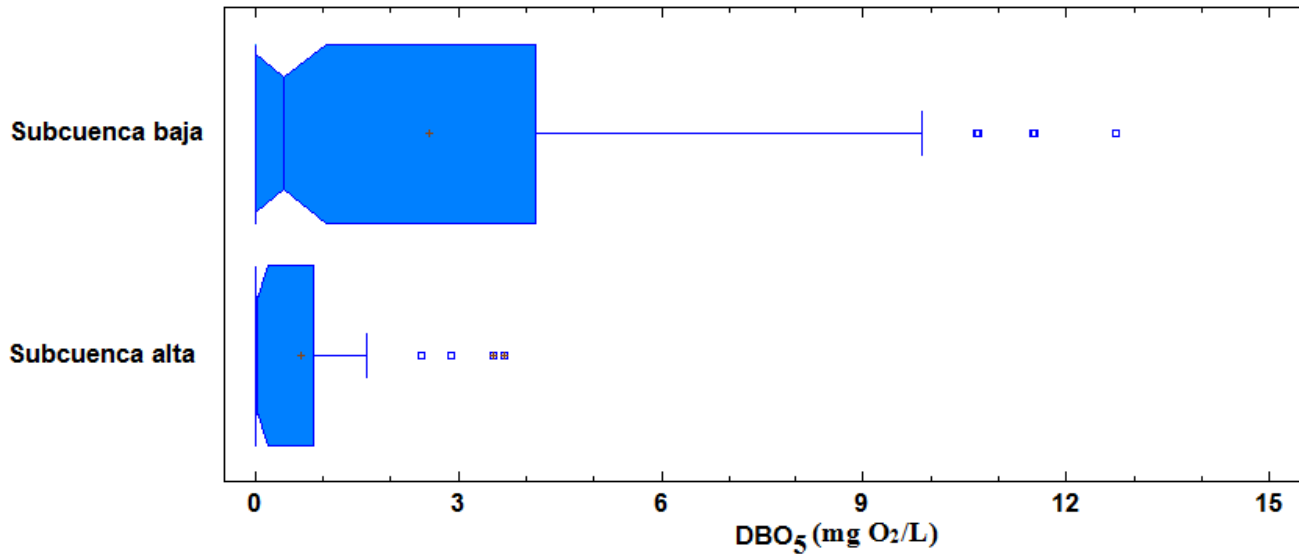


Figura 67. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DBO₅ en la subcuenca baja y alta.

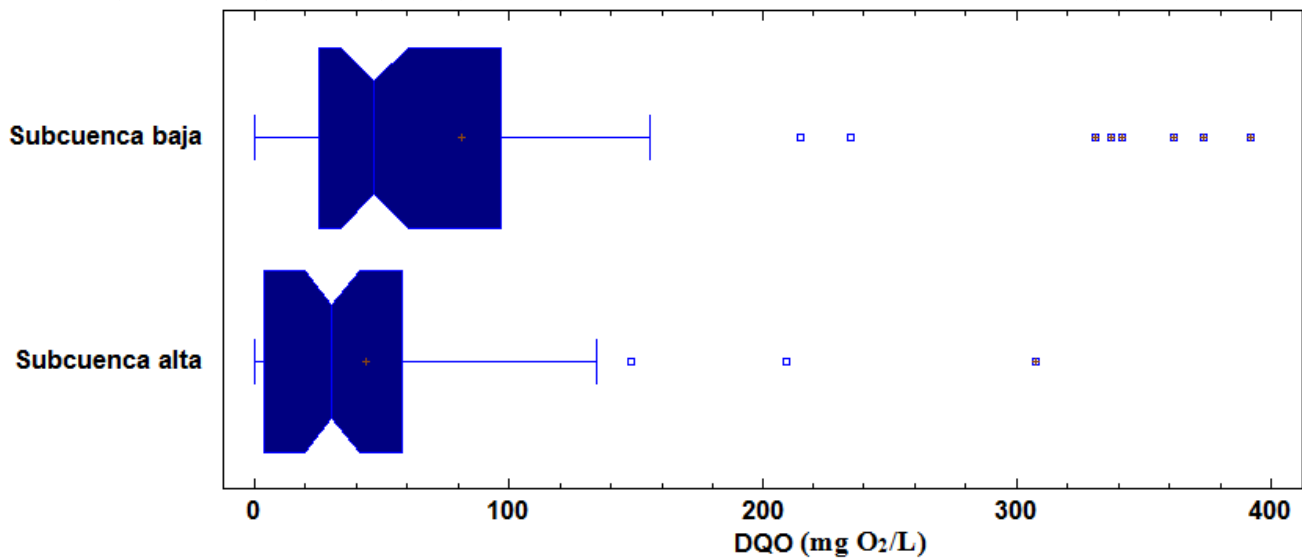


Figura 68. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DQO en la subcuenca baja y alta.

En el análisis no paramétrico de la comparación de medianas (W de Mann Whitney) para la conductividad eléctrica el valor de P calculado fue 0.000218093, por lo que existen diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de CE para las zonas alta y baja de la subcuenca con un nivel de confianza del 95%.

Las descargas de aguas residuales municipales así como de la agricultura contribuyen con iones que producen la salinidad como calcio, magnesio, potasio y sodio, así como sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y cloruros a las aguas receptoras. Así, la conductividad eléctrica apunta a que en la parte baja de la subcuenca existe un mayor número de fuentes de contaminación lo cual se corrobora con los parámetros anteriores.

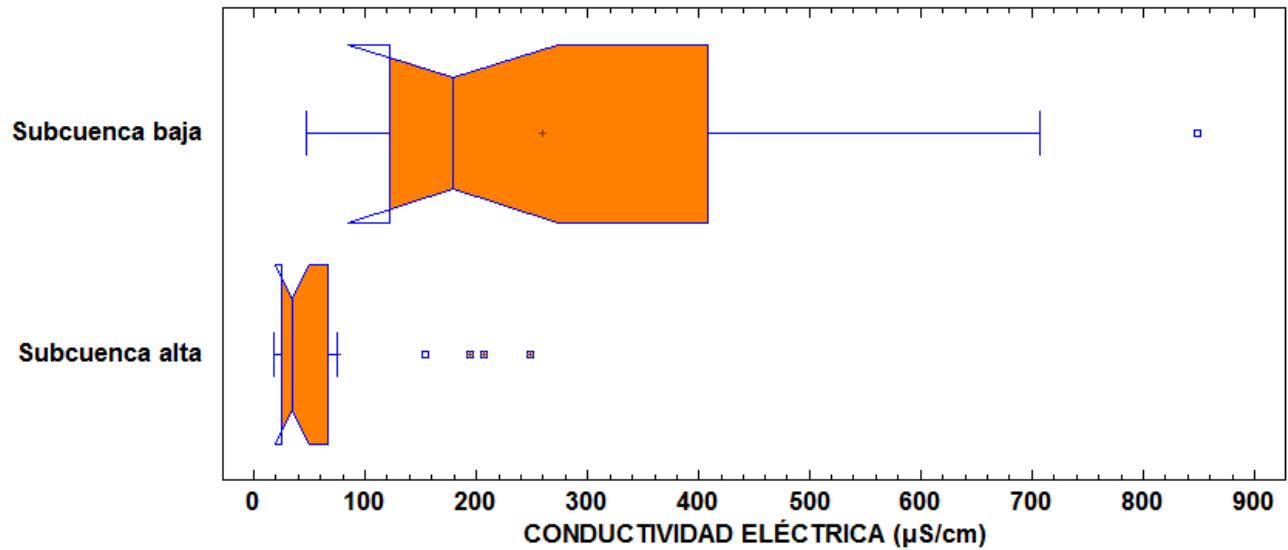


Figura 69. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de CE en la subcuenca baja y alta.

Los 20 sitios de muestreo se clasificaron por uso del suelo adyacente a los sistemas lóticos y se procedió a realizar la comparación de medianas por la prueba Kruskal-Wallis con un nivel de confianza de 95%. En todas las comparaciones de las medianas para todos los parámetros existieron diferencias significativas, para todos los parámetros sus valores de P establecen que existen diferencias significativas entre las medianas de los usos de suelo.

La zona forestal fue el uso del suelo que resultó con menores valores de DBO₅, se encontró relación con la cobertura agrícola y los manantiales los cuáles según CONAGUA (2015) tienen un nivel excelente en cuanto a su calidad respecto a la mediana usada en el análisis junto con el uso de pastizal montano, sin embargo hay manantiales que se encuentran con ligeros indicios de contaminación principalmente por la actividad humana que se realiza en estos. En las zonas urbanas se encontraron los niveles de contaminación orgánica más altos, sin embargo la mediana se encuentra en la clasificación de buena calidad aunque en los sitios más contaminados de esta clasificación llegan a incluirse en la categoría de calidad aceptable, es decir se encuentran contaminadas por materia orgánica, sin embargo tiene capacidad de autodepuración (Figura 70).

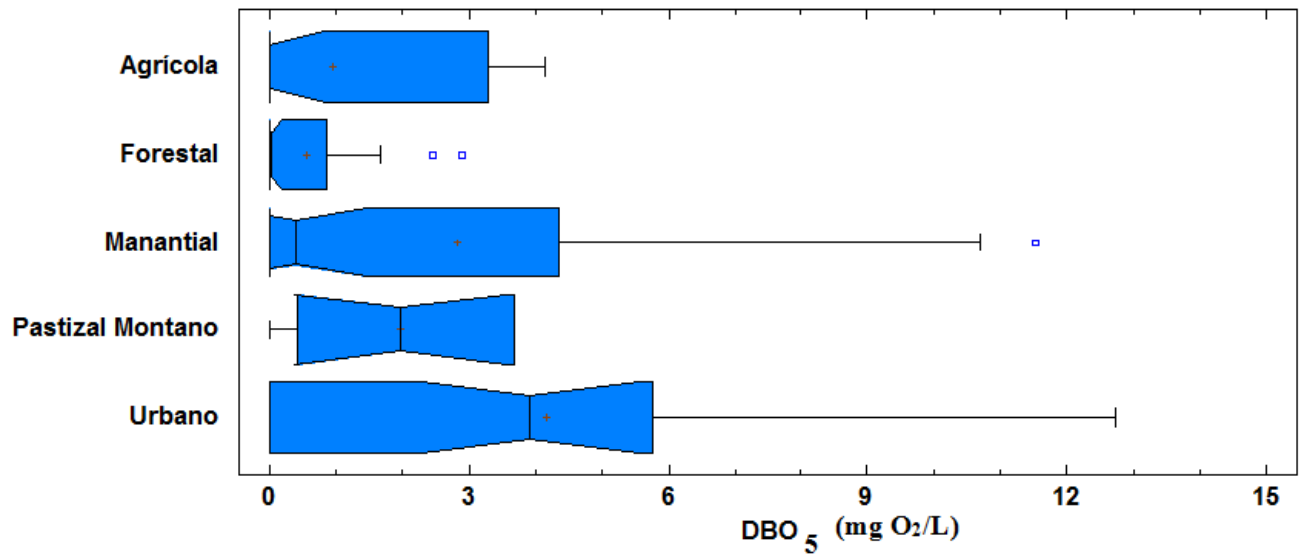


Figura 70. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DBO₅ en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

Para el caso de DQO, la mejor calidad fue representada por la zona de pastizal montano y la forestal ya que estos presentan la menor contaminación ya que se encuentran en las zonas de difícil acceso para el desempeño de actividades humanas las cuáles se clasifican con una calidad aceptable, seguida de los cultivos que se encuentran relacionados con los manantiales; la cobertura urbana cuenta con la mayor concentración de DQO llegando en algunos sitios a la clasificación de agua fuertemente contaminada debido a las descargas municipales de las localidades en la subcuenca las cuáles causan el aumento de contaminantes orgánicos tanto biodegradables como no biodegradables (Figura 71).

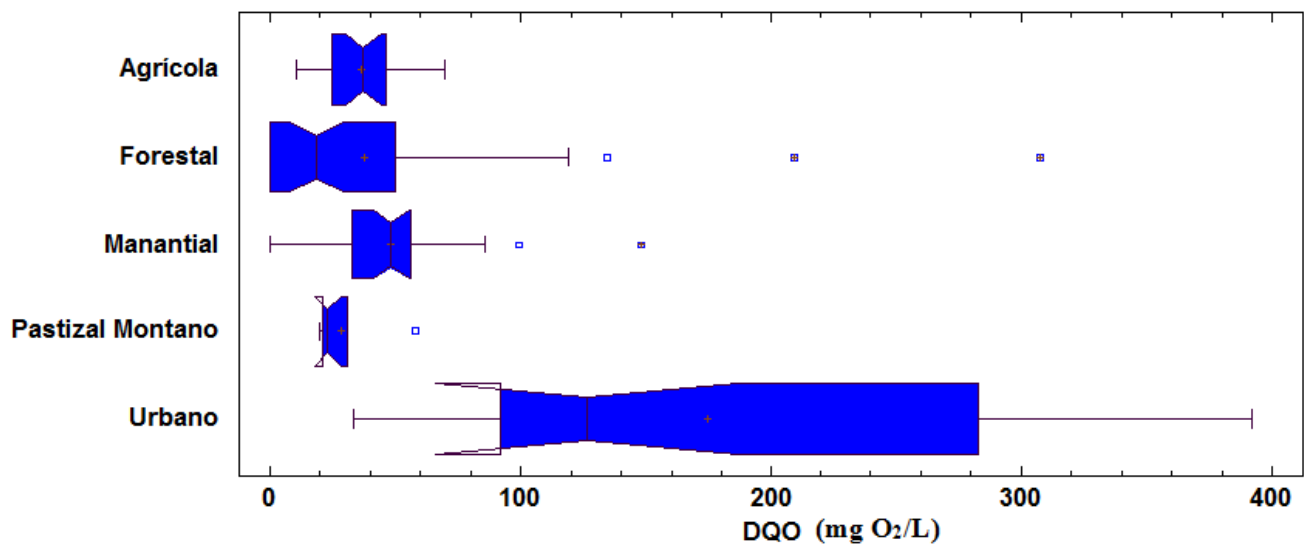


Figura 71. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de DQO en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

En cuanto a la conductividad eléctrica se encontraron diferencias significativas entre los diferentes usos del suelo, conforme disminuye la altitud va aumentando la salinidad por lo que los usos de suelo con mejor calidad del agua son los pastizales montanos y los bosques, seguido de manantiales, zonas agrícolas y con la mayor concentración de sales las zonas urbanas en donde se encuentra la parte más baja de la subcuenca ya que estos iones se acumulan hasta la parte más baja.

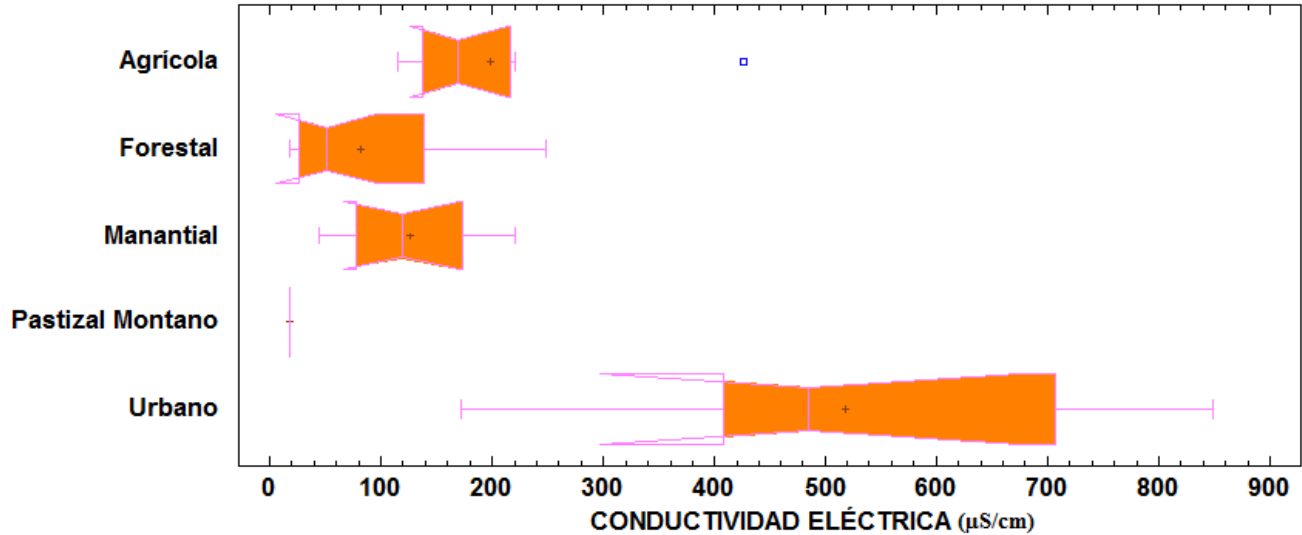


Figura 72. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de CE en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

En cuanto a las concentraciones de fósforo total (Figura 73) existen diferencias entre las medianas para los diferentes usos del suelo, la mejor calidad corresponde a las zonas altas de pastizal montano, seguida por la zona forestal y manantiales ya que estas coberturas carecen del desarrollo de actividades humanas, donde se muestran los indicios de contaminación es en el uso agrícola debido a la abundancia del uso de fertilizantes y plaguicidas, y las concentraciones mayores se dan en el uso urbano en donde además de aglomerarse los contaminantes de las partes superiores de la subcuenca se suman los aportes de las descargas residuales municipales.

En cuanto a ortofosfatos se tiene el mismo comportamiento que en fósforo total, las menores concentraciones se encuentran en el pastizal montano y los manantiales seguidos por el uso forestal (Figuras 75 y 76), las áreas agrícolas tienen una cantidad mayor a lo de anteriores usos, sin embargo los ríos reciben la mayor cantidad de ortofosfatos por las zonas urbanas debido al uso de jabones y detergentes que una vez utilizados son descargados a los sistemas lóticos ya que esta zona es donde se encuentran los asentamientos urbanos.

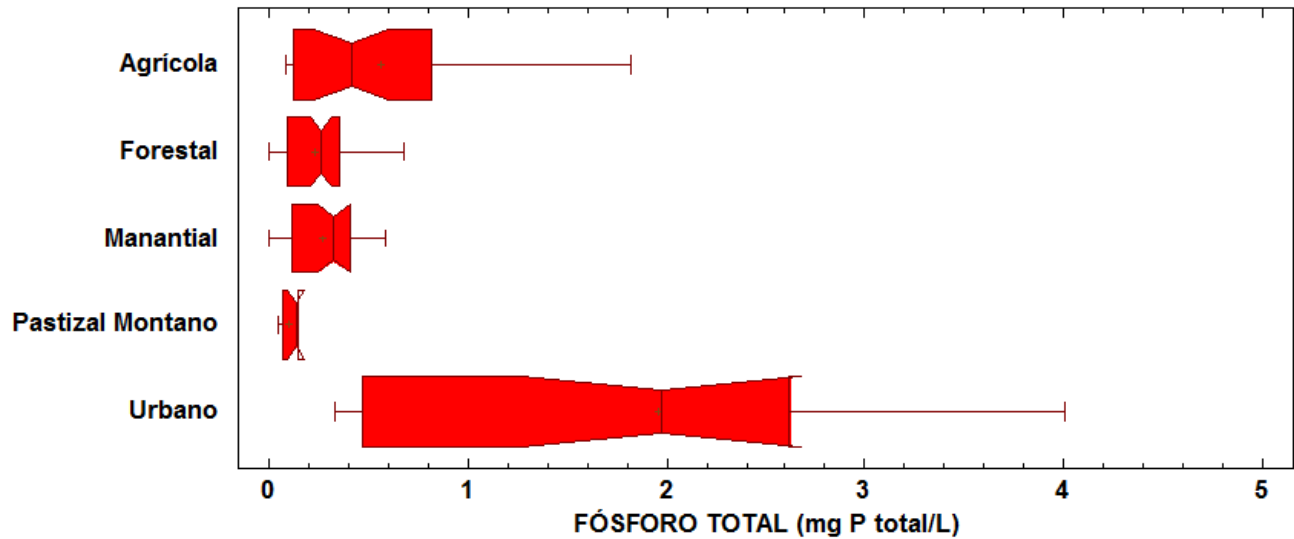


Figura 73. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de fósforo total en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

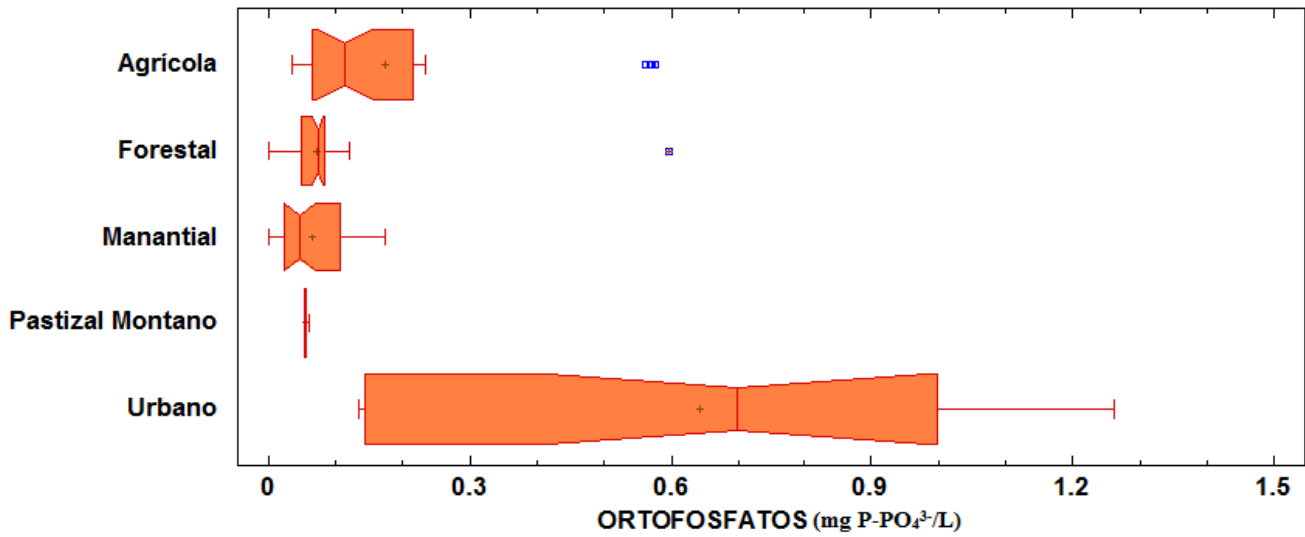


Figura 74. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de ortofosfatos en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.



Figuras 75 y 76. Sistemas lóticos en pastizal montano y bosque.

Para las medianas de las concentraciones de nitratos existen diferencias significativas entre los usos del suelo, el que resultó con la menor cantidad de nitratos es el pastizal montano seguida del forestal junto con el manantial, los que presentaron mayores concentraciones fueron las áreas agrícolas seguidas de los urbanas. En cuanto a las concentraciones de nitratos comparadas por los usos de suelo no se forman grupos, los niveles de concentraciones van escalonadas desde la menor en el pastizal montano y hasta el uso urbano, además de que las actividades agrícolas, ganaderas y descargas de aguas residuales a los ríos aumentan este componente, también se ve favorecido su aumento por el arrastre causado por la escorrentía y que a falta de vegetación riparia no es amortiguado su ingreso al sistema, por lo que en usos de suelo como agrícola y urbano donde se han modificado por completo los ecosistemas se lleva a cabo este fenómeno (Figura 77).

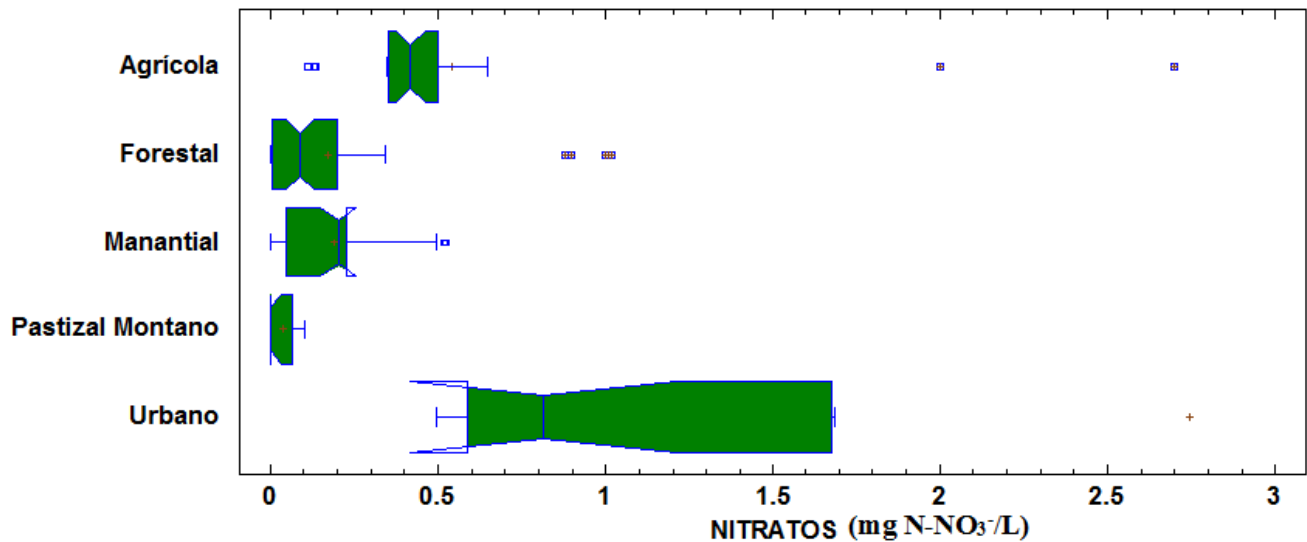


Figura 77. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitratos en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

Faltan 2 valores atípicos u outliers los cuales pertenecen a San Martín Texmelucan Salida de la cuenca y San Martín Texmelucan 2 ambos en época de secas.

En cuanto a la prueba Kruskal-Wallis para nitritos se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las medianas de los usos de suelo, entre los cuales el pastizal montano y forestal son los de mejor calidad presentando poca y nula concentración de nitritos junto con los manantiales, el uso agrícola contiene mayor cantidad de nitritos, sin embargo el uso urbano es el que posee las mayores concentraciones de esta forma de nitrógeno.

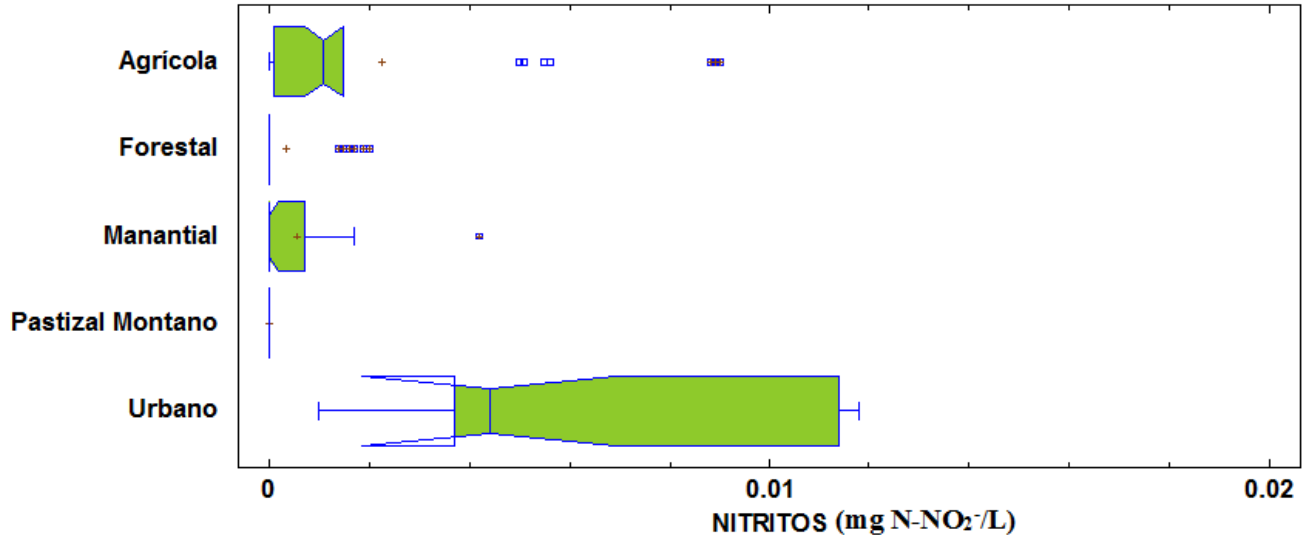


Figura 78. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de nitritos en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

Faltan valores atípicos los cuáles pertenecen al sitio San Rafael Tlanalapan Río en la época de lluvias con niveles de 0.23 y 0.24 mg N-NO₂⁻/L.

Para la comparación no paramétrica de medianas entre los usos de suelo se encontraron diferencias significativas entre las medianas de amonio, en cuanto a los usos del suelo se presentan niveles menores a 0.5 mg N-NO₂⁻/L, salvo en el urbano en donde se manifestó la mayor cantidad de amonio con niveles desde 5 hasta casi 14mg/L (Figura 79). Para esta medida de nitrógeno el uso forestal, manantial y pastizal montano forman el grupo con menores concentraciones seguidas del uso agrícola, sin embargo para el uso urbano se encuentran los mayores indicios de contaminación ya que en estos sitios se encuentran las localidades cuyos desechos aportan la mayor cantidad de contaminantes además de que la eliminación de vegetación nulifica el efecto buffer característico de la zona riparia.

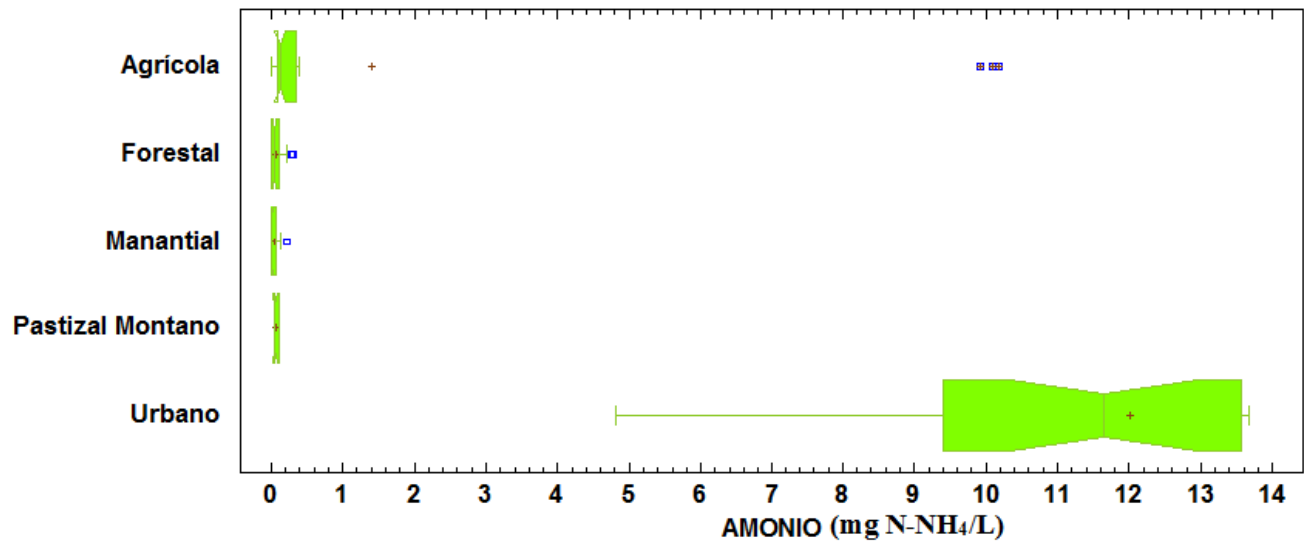


Figura 79. Gráfico de caja y bigotes para la comparación de amonio en los diferentes usos del suelo de la subcuenca de San Martín Texmelucan.

Faltan valores atípicos los cuales tienen niveles mayores a 20 mg/L de amonio en el sitio San Rafael Tlalnalalpan 2 en la época de secas.

CONCLUSIONES

- La calidad del agua es afectada por los diferentes usos de suelo, principalmente donde existen actividades antrópicas de agricultura y urbanización, lo que confirmó la hipótesis de acuerdo con los resultados de los parámetros de calidad del agua y las pruebas estadísticas.
- Los usos de suelo urbano, agrícola e incluso los manantiales presentaron mayores concentraciones en la mayoría de los parámetros del agua analizados, principalmente ocasionados por las actividades antrópicas.
- Existen diferencias significativas entre la subcuenca alta y la baja para el comportamiento de los parámetros físicos y químicos, ya que en la zona alta dominan los ecosistemas naturales con menor perturbación y sobre todo donde se encuentra el Parque Nacional Izta-Popo, mientras que en la parte baja dominan las zonas de cultivos y asentamientos humanos.
- El amonio, los nitritos y la DQO fueron las variables más significativas de la calidad del agua para la subcuenca San Martín Texmelucan.
- El uso de suelo urbano presenta una diferencia significativa con respecto a los otros usos de suelo, por lo que las zonas pobladas de la cuenca ejercen una mayor presión sobre el agua, ya que aportan descargas municipales y flujo de nutrimentos.
- La subcuenca baja posee un gran nivel de antropización, como lo refleja el análisis cartográfico.
- El uso de suelo dominante es el agrícola, en la zona baja es seguido del uso urbano el cual se incrementa día con día y como consecuencia genera la disminución de zonas destinadas a la agricultura.
- La segunda extensión más amplia pertenece al uso forestal la cual muestra aumento en su superficie por la recuperación en las zonas de vegetación secundaria.
- La tasa de cambio del uso urbano es la más alta en ganancias de territorio, mientras que en pérdidas son la vegetación secundaria de bosque de pino y los cuerpos de agua.
- Los cuerpos de agua y vegetación secundaria se verán disminuidos ampliamente en futuros años mientras que el uso urbano según la prospección podría pasar a más del triple de su extensión de 1993 a 2040.
- La mayor parte de la subcuenca permanece sin cambios, ya que la conservación y permanencia son los procesos de cambio mayoritarios.
- Los cambios positivos (Regeneración y revegetación) son menores a los cambios negativos (Alteración, deforestación y Urbanización), por lo que la subcuenca se ve afectada como consecuencia del incremento en los poblados y a las pocas actividades de restauración en ecosistemas naturales.
- Los procesos de deforestación y urbanización son causantes de la pérdida de corrientes superficiales en los sitios caracterizados como secos, aunado a obras de infraestructura realizadas por pobladores y gobierno estatal.

- Las proyecciones de escenarios futuros y sus tendencias indican:
 - Pérdida de tierras de cultivo e incrementos de áreas urbanas
 - Crecimiento de la zona forestal principalmente al interior del PNIP y aumento del área sin vegetación por pérdida de pastizal montano.
 - Se prevé transformación de las zonas de pastizales inducidos a vegetación secundaria de bosque de pino, así como de vegetación secundaria a forestal, procesos que indican la recuperación del bosque en la parte alta de la subcuenca.
 - El análisis supone la conservación y recuperación de la zona forestal gracias a la delimitación del PNIP, sin embargo el pastizal montano resulta con un déficit en su extensión.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguilar, A. (2010). *Calidad del agua: Un enfoque multidisciplinario*. México, D.F. Instituto de Investigaciones Económicas. 308 pp.
2. Aguilar, V. (2003). *Aguas continentales y diversidad biológica de México: Un recuento actual*. Biodiversitas. México. Boletín bimestral de la comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad. Año 8. Núm.43. Mayo de 2003. 16 pp.
3. Aparicio, F. (1994). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México, D.F. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. 303 pp.
4. APHA, AWWA and WPCF. (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. (17° edición). Washington. Editorial Díaz Santos. 1995 pp.
5. Arce, A., Caldeón, C. y Tomasini, A. (s.f.). *Serie autodidáctica de la medición de la calidad del agua: Fundamentos técnicos para el muestreo y análisis de aguas residuales*. México. Editorial CNA e IMTA. 50 pp.
6. Arriaga, L., Aguilar, V. y Alcocer, J. (2000). *Aguas continentales y diversidad biológica de México. Escala 1:4, 000,000*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, (Citado en: Carabias, J., Rosalva, L., Collado, J., y Martínez, P. (2005). *Agua, Medio Ambiente y Sociedad hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en México*. México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México: El Colegio de México: Fundación Gonzalo-Río Arronte. 221 pp.).
7. Auquilla, R., Astorga, Y. y Jiménez, F. (2005). *Influencia del uso del suelo en la calidad del agua en la subcuenca del río Jabonal, Costa Rica*. Costa Rica. Recursos Naturales y Ambiente. 48:81-92.
8. Blancas, G. Constanzo, E. Cervantes, A. Gómez, J. (2011). *Manual de Análisis de aguas naturales y su aplicación a la microescala*. México, D.F. UNAM. FES Zaragoza. 76 pp.
9. Brüsweiler, S., Höggel, U. y Kläy, A. (2004). *Los Bosques y el Agua: Interrelaciones y su Manejo*. Suiza. Informes de Desarrollo y Medio Ambiente. 19: 10-13.
10. Carabias, J., Rosalva, L., Collado, J. y Martínez, P. (2005). *Agua, Medio Ambiente y Sociedad hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en México*. México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México: El Colegio de México: Fundación Gonzalo Río Arronte. 221 pp.
11. Ceccon, E. (2003). *Los bosques ribereños y la restauración y conservación de las cuencas hidrográficas*. México. Ciencias. 72 (Octubre-Diciembre): 46-72.
12. Challenger, A. (1998). *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: Pasado, presente y futuro*. México. Conabio-Instituto de Biología, UNAM-Agrupación Sierra Madre, (Citado en: Conabio. (2008). Vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 621 pp.).
13. CNA. (2011). Comisión Nacional del Agua. *Indicadores de calidad del agua*. <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=63&n3=98&n4=98> (noviembre 2013).
14. CONABIO. (1998). *Subcuencas hidrológicas. Extraído de Boletín hidrológico. (1970). Subcuencas hidrológicas en Mapas de regiones hidrológicas. Escala 1:1,000,000*. México. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Jefatura de Irrigación y control de Ríos, Dirección de Hidrología. Consultado en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

15. CONABIO. (2008). Vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 621 pp.
16. CONAGUA. (2011). *Clasificación de cuerpos de agua Nacionales: Ríos Atoyac y Xochiac o Hueyapan, y sus afluentes (Puebla y Tlaxcala)*. México. Diario Oficial de la Federación. 6 de Julio del 2011.
17. CONAGUA. (2014). *Estadísticas del Agua en México edición 2014*. México. Subdirección General de Planeación. 239 pp.
18. CONAGUA. (2015). *Monitoreo de Calidad del Agua*. México. Subdirección General Técnica, Gerencia de Calidad del agua. 22 pp. Consultado en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/TF_CalidadAgua/CalidaddeIAgua.pdf
19. CONANP. (2010). *Parque Nacional Izta-Popo Zoquiapan*. México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Consultado en: <http://iztapopo.conanp.gob.mx> (Noviembre 2013).
20. Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización*. México, D.F. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V. 231 pp.
21. Crosby, A. (1986). *Ecological imperialism: The biological expansion of Europe*. Cambridge. Cambridge University Press. (Citado en: Conabio. (2008). Vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 621 pp).
22. Curtis, H., Barnes, N., Schnek, A. y Massarini, A. (2009). *Biología*. 7a. edición. Buenos Aires, Argentina. Editorial Médica Panamericana. 1160 pp.
23. De Anda, P. y Miranda, P. (2004). *Contribución al conocimiento de la Calidad del agua en diferentes corrientes superficiales del Parque Nacional IztaPopo y su zona de influencia*. Tesis, Licenciatura. México. FES Zaragoza. UNAM. 86 pp.
24. De la Lanza, E. (1990). *Algunos conceptos sobre hidrología y calidad del agua*. En: Arredondo F. y compiladores. *La acuacultura en México: de los conceptos a la producción*. México D.F. Instituto de Biología y UNAM, 181-199 pp. (Citado en: Gómez, J., Blancas, G., Constanzo, E. y Cervantes, A. (2014). *Análisis de la calidad de aguas naturales y residuales con aplicación a la microescala*. México. UNAM, FES Zaragoza. 203 pp).
25. Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA) Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia. 102 pp.
26. Dodds, W. and Whiles, M. (2010). *Fresh Water Ecology: concepts and environmental applications*. San Diego, California, USA. Academic Press. 569 pp.
27. FAO. (2005). *Land Cover Classification System (LCCS), versión 2: Classification Concepts and User Manual*. Rome, Italy. FAO Environment and Natural Resources Services Series. No. 8. 208 pp.
28. FAO. (2009). *Los Bosques y el agua. Estudio temático elaborado en el ámbito de la Evaluación de los recursos forestales mundiales. 2005*. Roma, Italia. FAO. 86 pp.
29. FAO. (2010). *Global Forest Resources Assessment 2010: Main report*. Rome, Italy. FAO Forestry Paper 163. Food and Agriculture Organization. 340 pp.

30. Friedl, G., Teodoru, C. and Wehrli, B. (2004). *Is the Iron Gate A reservoir on the Danube River a sink for dissolved silica?* Biogeochemistry 68:21-32. (Citado en: UNEP GEMS. (2008). *Water Quality for Ecosystem and Human Health*. 2nd Edition. Ontario, Canada. Water Programme Office c/o National Water Research Institute. 120 pp).
31. Fuentes, F. y Massol-Deyá, A. (2002). *Manual de laboratorios: Ecología de microorganismos. Segunda parte Parametros Fisico-Quimicos: Conductividad*. Puerto Rico. Universidad de Puerto Rico. 1- 4pp.
32. Galicia, E. (2013). *Cambios en los Procesos de Irrigación en las zonas de recarga y descarga de Agua Subterránea. Subcuenca San Martín Texmelucan, Puebla*. Siglo XX. México, D.F. Coloquio Agua Subterránea en México. Instituto de Ciencias Sociales y Humanidades “Alfonso Vélaz Pliego”. Noviembre, 2013.
33. Galicia, L. & García-Romero, A. (2007). *Land Use and Land Cover Change in Highland Temperate Forests in the IztaPopo National Park, Central Mexico*. Switzerland. International Mountain Society. Mountain Research and Development. Vol. 27, No. 1. February 2007: 48–57pp.
34. García, E. y CONABIO. (1998). *Mapa de Climas, escala 1:1, 000,000*. Consultado en: http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/clima1mgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no (Mayo del 2015).
35. Gómez, J., Blancas, G., Constanzo, E. y Cervantes, A. (2014). *Análisis de la calidad de aguas naturales y residuales con aplicación a la microescala*. México. UNAM, FES Zaragoza. 203 pp.
36. Guerra, E. y Cruz, G. (2014). *Métodos de Evaluación y Diagnóstico para Agua y Suelo*. México. PAPIME PE 205510. DDGAPA-UNAM. 155 pp.
37. Granados-Sánchez, D., Hernández, M. y López, G. (2006). *Ecología de las zonas ribereñas*. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente. México. Universidad Autónoma de Chapingo. 12 (1): 55-69 pp.
38. Harper, D. y Ferguson, A. (1997). *The Ecological Basis for River Management*. England. John Wiley and Sons Ltd. 614 pp.
39. Harrison, M. (1996). *Pollution: Causes, effects, and Control*. 3rd Edition. United Kingdom. The Royal Society of Chemistry. 480 pp.
40. Hornung, M. and Reynolds, B. (1995). *The effects of natural and anthropogenic environmental changes on ecosystem processes at the catchment scale*. Trends in Ecology and Evolution. 10: 443-449. Citado en: Giller, P. and Malmqvist, B. (1998). *The Biology of Streams and Rivers*. USA. Oxford University Press. 295 pp.
41. INAFED. (2010). *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. Estado de Puebla*. Consultado en (Septiembre de 2014): <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/index.html>
42. INEGI. (1994). Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0. Subcuenca Hidrográfica RH18-R. Atoyac - San Martín Texmelucan. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/hidrologia/Descarga.aspx>
43. INEGI. (2005). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación, Serie III (continua nacional), escala 1:250 000*. México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

44. INEGI. (2014). *Geología: Rocas. Mapa Digital de México*. México. Consultado en (Septiembre del 2014): <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/>
45. La Jornada. (2006). *Agua*. México. (Citado en: Cristina, M. Kauffer, E. Álvarez, G. (2010). *Environmental Perceptions of Surface Water Quality in Chiapas's Río Fogótico Micro Watershed. Frontera Norte*. 22 (43): 129-158 pp).
46. Matthews, E., Rohweder, M., Payne, R. y S. Murra. (2000). *Pilot analysis of global Ecosystems: Forest Ecosystems*. USA. World Resources Institute. (Citado en: Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización*. México. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V. 231 pp).
47. Meli, P. y Carrasco-Carballido, V. (2011). *Restauración ecológica de riberas Manual para la recuperación de la vegetación ribereña en arroyos de la Selva Lacandona*. México. Corredor Biológico Mesoamericano México. Serie Diálogos, Número 5. CONABIO. 62 pp.
48. Neyra, J. (2012). *Guía de las altas montañas de México y una de Guatemala*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 411 pp.
49. Norma Mexicana NMX-AA-004-SCFI-2013: *Análisis de agua, medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba (cancela a la NMX-AA-004-SCFI-2000)*
50. Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001: *Análisis para la determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅), y residuales tratadas. (Diario Oficial de la Federación. México, D.F., a 6 de abril de 2001)*.
51. Norma Mexicana NMX-AA-029-SCFI-2001: *Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela A LA NMX-AA-029-1981)*
52. Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2009: *Análisis de agua. Determinación de la conductividad eléctrica. Método de prueba (cancela a la NMX-AA-093-SCFI-2000)*.
53. Norma Mexicana NMX-AA-154-SCFI-2011: *Análisis de agua - determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales, residuales, residuales tratada y marina - método de prueba*.
54. Ochoa-Gaona, S. and Gonzáles-Espinosa, M. (2000). *Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, Mexico*. Applied Geography 20 (2000) 17–42 pp.
55. PNUMA y Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente/Agua. (2007). *Programa Mundial de Evaluación de Recursos Hídricos (WWAP)*.
56. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2008). *Water Quality for Ecosystems and Human Health*. 2nd Edition. Centro Regional Europeo de Ecohidrología (ERCE), Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 120 pp.
57. Reid, G. and Wood, R. (1976). *Ecology of inland waters and estuaries*. D. Van Nostrand Company, Cincinnati. 485 pp. (Citado en: Gómez, J., Blancas, G., Constanzo, E. y Cervantes, A. (2014). *Análisis de la calidad de aguas naturales y residuales con aplicación a la microescala*. México. UNAM, FES Zaragoza. 203 pp).
58. Revenga, C. Brunner, J. Henninger, N. Kassem, K. and Hammond, A. (1998). *Watershed of the world. Ecological Value and Vulnerability*. Washington, D.C. USA. World Resources Institute.

- (Citado en: Cotler, H. (2010). *Las cuencas hidrográficas de México, diagnóstico y priorización*. México. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A. de C.V. 231 pp).
59. Rosales, J. (2000). *An ecohydrological approach for riparian forest biodiversity conservation in large tropical rivers*. Birmingham, UK. Ph. D. Thesis. University of Birmingham. (Citado en: Díaz, W., Rueda, J., Acosta, O., Martínez, O. Castellanos, H. (2010). *Composición florística del bosque ribereño del río José, reserva forestal de Imataca, estado Bolívar, Venezuela*. Venezuela. Acta Botánica Venezolana. 1 (33) 1-21 pp).
60. Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México. Limusa. (Citado en: Conabio. (2008). Vol. II: *Estado de conservación y tendencias de cambio*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 621 pp.).
61. SEMARNAT. (2013). *Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl*. México. Martes 2 de abril de 2013. DIARIO OFICIAL (Tercera Sección). 185 pp.
62. Stephenson, G. y Solomon, K. (2013). *Plaguicidas y ambiente*. Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica. 580 pp.
63. Teixeira, F. (2007). *Efecto del uso del suelo sobre la calidad del agua y las comunidades de peces en sistemas lóticos de la cuenca baja del río Santa Lucía (Uruguay)*. Uruguay. Trabajo final para la obtención del título de Magíster en Ciencias Ambientales. Universidad de la República. Facultad de ciencias, maestría en ciencias ambientales. 58 pp.
64. Trejo, I. and Dirzo, R. (2000). *Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico*. Biological Conservation, 94 (2) 133-142 pp.
65. UNEP GEMS. (2008). *Water Quality for Ecosystem and Human Health*. Ontario, Canada. 2nd Edition. Water Programme Office c/o National Water Research Institute. 120 pp.
66. Vázquez, D. 2012. Estudio hidrogeológico de la subcuenca hidrográfica Atoyac - San Martín Texmelucan, Puebla. Geos. Geohidrología. 32 (1) 46-47 pp.
67. Wanielista, M., Kersten, R and Eaglin. R. (1997). *Hydrology: Water Quantity and Quality Control*. USA. 2nd Edition. John Wiley and Sons, Inc. 567 pp.
68. Wetzel, R. (2001). *Limnology. Lakes and Rivers Ecosystem*. USA. Third Edition. Academic Press. 1006 pp. (Citado en: Gómez, J., Blancas, G., Constanzo, E. y Cervantes, A. (2014). *Análisis de la calidad de aguas naturales y residuales con aplicación a la microescala*. México. UNAM, FES Zaragoza. 203 pp).
69. WOH. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. Switzerland. 4th ed. WHO Press. 541 pp.
70. Xia, L., Liu, R., Zao, Y. (2012). *Correlation Analysis of Landscape Pattern and Water Quality in Baiyangdian Watershed*. China. Beijing Normal University. Procedia Environmental Sciences. 13: 2188-2196 pp.