



Universidad Autónoma de Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas

Simulación de la disponibilidad y demanda de agua
de la microcuenca de Cañada Grande, PNLM,
Tlaxcala

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

Alfonso Torrejón González

Codirectores

Dr. Juan Suárez Sánchez

Dr. Amando Bautista Ortega

Tlaxcala, Tlax.

Marzo, 2022



Universidad Autónoma de Tlaxcala

Posgrado en Ciencias Biológicas

Simulación de la disponibilidad y demanda de agua
de la microcuenca de Cañada Grande, PNLN,
Tlaxcala

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE
MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

P r e s e n t a

Alfonso Torrejón González

Comité Tutorial

Dr. Juan Suárez Sánchez

Dr. Amando Bautista Ortega

Dr. Johannes C. Van Der Wal

Dr. Jorge Vázquez Pérez

Tlaxcala, Tlax.

Marzo, 2022

Hoja de financiamiento

El presente proyecto de tesis fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del apoyo recibido en la beca CONACYT (1006893) en la Maestría en Ciencias Biológicas registrada en el Programa para el Fortalecimiento del Posgrado Nacional, Padrón Nacional de Posgrado; realizada en las instalaciones del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, Unidad periférica del Instituto de Investigación de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Oficio de autorización



Universidad Autónoma de Tlaxcala
Centro Tlaxcala Biología de la Conducta (CTBC)
Maestría en Ciencias Biológicas
Proceso: Posgrado CTBC
Registro: Carta Autorización de Impresión de Tesis

Código: 503-RGE-26

Revisión: 03

COORDINACIÓN MAESTRÍA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA P R E S E N T E

Los abajo firmantes, miembros del jurado evaluador del proyecto de tesis que **Alfonso Torrejón González** realiza para la obtención del grado de **Maestro en Ciencias Biológicas**, expresamos que, habiendo revisado la versión final del documento de tesis, damos la aprobación para que ésta sea impresa y defendida en el examen correspondiente. El título que llevará es “**Simulación de la disponibilidad y demanda de agua de la microcuenca de Cañada Grande del PNLM, Tlaxcala**”.

Sin otro particular, aprovechamos para enviarle un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
TLAXCALA, TLAX., MARZO 28 DE 2022


DRA. MARGARITA MARTÍNEZ GÓMEZ


DR. JUAN SUÁREZ SÁNCHEZ


DR. JOHANNES CORNELIS VAN DER WAL


DR. JORGE VÁZQUEZ PÉREZ


DRA. SILVIA CHAMIZO CHECA

Agradecimientos.

Mi agradecimiento al CONACYT, por el apoyo de la beca otorgada, con la cual no hubiese podido realizar el trabajo.

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Autónoma de Tlaxcala, a todas las autoridades y personal del Centro Tlaxcala de Biología de la Conducta (CTBC), por confiar en mí, abrirme las puertas y permitirme realizar todo el proceso investigativo dentro de su centro de investigación.

Mis grande y sincero agradecimiento a la Dra. Elvia Ortiz por creer en mí y haberme brindado el apoyo en esta nueva etapa de formación, haciendo que pueda crecer día a día en mi carrera profesional, gracias por su apoyo incondicional.

De igual manera a la Dra. Margarita Martínez Gómez quien con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda concluir esta gran etapa, gracias por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional.

A mis tutores, al Dr. Hans, por sus asertivos y grandes aportes a este trabajo que, si no fuese por ellos dejaríamos fuera temas importantes, al Dr. Jorge Vázquez Pérez por los comentarios oportunos al trabajo, al Dr. Amando por sus enseñanzas, paciencia, la motivación, en especial quiero agradecer al Dr. Juan Suárez Sánchez, que me guio durante todo este proceso, quien con su dirección, conocimiento, enseñanza, amistad y colaboración permitió el desarrollo y conclusión de este trabajo.

A mis padres por el apoyo incondicional durante el periodo de este trabajo, sobre todo los días que salía a campo, han sido un impulso permanente, no solo para este trabajo si no desde siempre. Gracias.

A todos los involucrados en este trabajo al LCA. Elías Vázquez Chamorro, por el acompañamiento y ayuda permanente en toda la realización de este trabajo, que, aunque se generaron inconvenientes por el tema de pandemia, solucionábamos y me impulsaba para seguir con el trabajo.

Índice

Introducción	1
Antecedentes	5
Justificación.....	9
Hipótesis.....	10
Objetivos	11
Específicos	11
Metodología	12
❖ Precipitación	12
❖ Evapotranspiración	13
❖ Cubierta vegetal y uso de suelo:	13
❖ Escorrentía	13
❖ Infiltración:	14
Resultados	18
Caracterización de la microcuenca de la cañada grande de la Malinche:	18
Discusión.....	38
Conclusiones	42
Referencias.....	45

Introducción

Existe una problemática nacional relativa a la disminución del agua en los cauces de los ríos, derivada de la competencia entre usos y la falta de regulación conforme la disponibilidad del recurso, como, por ejemplo, la demanda de agua en sitios aguas arriba de las cuencas hidrológicas, no considera la conservación de un escurrimiento p. ej. desde una montaña hacia las partes bajas, así como en el caso del agua subterránea, no considera la descarga del acuífero hacia cuerpos de agua superficiales (NMX-AA-159-SCFI-2012).

Las regiones montañosas cubren aproximadamente una cuarta parte de la superficie terrestre de la Tierra y albergan alrededor de 1100 millones de personas. A menudo se les conoce como las "torres de agua del mundo" (es un término que se utiliza para describir el papel del almacenamiento y el suministro de agua, papel que desempeñan las cadenas montañosas para sostener las demandas ambientales y humanas de agua río abajo), porque las cuencas de los ríos con cabeceras en las montañas suministran agua dulce a más de la mitad de la humanidad (ONU, 2019).

En México, en algunas de sus principales cuencas hidrológicas, se registra ya una condición de escasez que se espera se vea incrementada, aún sin cambio climático, por efecto del crecimiento demográfico esperado, la creciente concentración urbana, la contaminación de cuerpos de agua y la sobreexplotación de los recursos hídricos, en particular los subterráneos. En efecto, una amplia región del centro y norte de México presentaba ya en 2005 condiciones de disponibilidad muy baja y en la cuenca del valle de México, extremadamente baja. Por efecto del crecimiento poblacional, el desarrollo económico regional y el crecimiento demográfico, se espera que para el año 2030 varias regiones hidrológicas de importancia y gran extensión se encuentren en condiciones de disponibilidad extremadamente baja. Este escenario, sin embargo, aún no incorpora los efectos del cambio climático. Una de las mayores preocupaciones de la sociedad en relación con el cambio climático se refiere a sus posibles efectos en los recursos hídricos. De hecho, el clima y el ciclo hidrológico están tan íntimamente relacionados que es difícil definir las fronteras entre ellos; el clima depende de variables relevantes del ciclo hidrológico, tales como la humedad ambiental y la precipitación (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012).

Para mantener la estabilidad de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, así como permitir la protección de los ecosistemas riparios, ecosistemas acuáticos terrestres y costeros, es necesario que se garantice un régimen de caudal ecológico en las corrientes o escurrimientos (NOM-159, 2012). Para esto se realiza un balance a escala cuenca hidrográfica, considerando que esta es el área terrestre por donde el agua de lluvia, nieve o deshielo, transita hacia una corriente principal, un río y por ésta hacia un almacenamiento que puede ser un lago, laguna o el mar (Carreón, 2008). El caudal ecológico es un instrumento de gestión que permite acordar un manejo integrado y sostenible de los recursos hídricos, que establece la calidad, cantidad y régimen del flujo de agua requerido para mantener los componentes, funciones, procesos y la resiliencia de los ecosistemas acuáticos que proporcionan bienes y servicios a la sociedad (WWF, 2011).

El Parque Nacional Malinche (PNLM) ofrece una buena oportunidad para implementar un manejo integrado y sostenible del recurso hídrico desde la perspectiva del manejo integral de cuencas. El PNLM forma parte de la faja volcánica transmexicana, se considera la quinta montaña más alta de México, es el décimo primer parque con mayor extensión de los 67 Parques Nacionales decretados en el país, comprende una superficie total de 46,112.24 ha (DOF, 2015). Es una Área Natural Protegida (ANP), que tiene como propósito conservar la alta diversidad de especies y endemismos que se presentan en la superficie manejadas a través de un instrumento rector o programa de manejo (PM), esto mediante acciones de protección, manejo, restauración, conservación de la diversidad biológica y cultural (CONANP, 2014).

Se dice que el PNLM es un museo viviente de organismos locales, ya que cuenta con una amplia diversidad faunística, 937 especies descritas (decenas de ellas endémicas), su vegetación más representativa incluye bosques de alta montaña, de encino, oyamel, pastizales y vegetación inducida, como lo son los cultivos agrícolas (SEMARNAT, 2016). Cuenta con un total de 28 especies de herpetofauna descritas, donde destacan dos especies de anfibios: *Ambystoma velasci* y *Pseudoeurycea gadovii*, que se encuentran bajo la norma; este parque ofrece ecosistemas ideales debido a que funge como una isla de conservación, que en su periferia cuenta con áreas de cultivo, ofreciendo un refugio muy adecuado para anfibios, reptiles y organismos de la región (Méndez de la Cruz et al., 2018).

La estabilidad ecológica de La Malinche ha sido amenazada por la presencia de las ciudades de Puebla y Tlaxcala y el gran número de poblaciones de ambos estados aledañas al PNLM. Las condiciones del suelo y subsuelo, así como las pendientes, propician que el agua drene muy rápido, por lo que se registran corrientes de agua temporales y los manantiales en esta región son muy escasos, además de que el nivel freático de las aguas subterráneas es relativamente poco profundo, sobre todo a altitudes menores de 3,000 msnm, ya que el material consolidado de los suelos tiene un alto grado de permeabilidad lo que provoca una infiltración alta. Las fuentes de abastecimiento y el volumen de extracción promedio de agua potable en los estados de Tlaxcala y Puebla, demuestran la gran importancia que La Malinche tiene como abastecedora de este vital líquido, sobre todo a partir de las aguas subterráneas. Se ha calculado que la precipitación pluvial de la zona de La Malinche provocaba un escurrimiento anual de aproximadamente 430 m³/ha, llenando los mantos freáticos en unos 150 millones de m³ al año. Sin embargo, a medida que la montaña se desforesta, disminuye esta infiltración y se incrementa el arrastre de sedimentos, así como la erosión eólica del suelo, que afectan superficies de 32,209 ha y 13,085 ha, respectivamente (Llaguno Méndez et al. 2009).

Las causas de la disminución del agua en el PNLM son la escasez de precipitaciones provocada principalmente por el cambio climático y la baja infiltración debido a la falta de cobertura vegetal, que en su mayoría es provocada por la deforestación, en conjunto esto provoca que la infiltración disminuya en un 20% (Llaguno Méndez et al. 2009). Además, recientemente se ha originado una pérdida importante de masa forestal, aún sin cuantificar, debido a la proliferación del escarabajo descortezador *Dendroctonus adjunctus* en 2021. Pero los efectos más severos del cambio climático sobre el PNLM aún están por ocurrir pues se prevee que este fenómeno afectará sustancialmente los recursos hídricos actualmente disponibles en todo el mundo. Las series históricas, consideradas hasta ahora como estadísticamente representativas del ciclo hidrológico local, no serán suficientes para la gestión futura del agua. Adicionalmente, en México, los efectos esperados del cambio climático serán un incremento importante de temperaturas (superior a 3 °C) y una disminución en la precipitación (superior al 15% en promedio nacional anual). Como consecuencia, se verá disminuido el escurrimiento superficial y la recarga de acuíferos y, por lo tanto, la disponibilidad de agua, lo que se sumará

al estrés hídrico que producirá el crecimiento poblacional y económico. (Martínez-Austria & Patiño-Gómez, 2012).

En el PNLM las poblaciones de Ixtenco y Pilares, utilizan los manantiales y los escurrimientos de la cuenca, en la zona conocida como Cañada Grande anteriormente conocida como Barranca Axaltzintle. Esas poblaciones han entrado en conflictos desde hace 20 años, lo que ha suscitado en riñas entre los habitantes de estas dos poblaciones por apropiarse de los escurrimientos de agua provenientes de los manantiales, para abastecer sus necesidades hídricas (Acuña Andrey, N. 2018). En esta área, las corrientes de agua son intermitentes con excepción del escurrimiento de agua de la Barranca Axaltzintle que es perenne, pero los locales la entubaron y se conduce desde hace algunos años (VW, 2014). Esto afectó negativamente el abastecimiento de agua a los organismos de la barranca y una posible disminución de la biodiversidad. De todo esto, podemos percatarnos que existe una problemática compleja entre la disponibilidad y demanda del agua en el PNLM, que debe ser atendida para garantizar la sustentabilidad de los ecosistemas y los habitantes usuarios de éste recurso.

Actualmente (2021) el PNLM, sufre un grave problema debido a estrés por sequía y calor extremo que se manifiestan a lo largo de muchos años, la mortalidad de los árboles se debe por lo general a factores múltiples e interrelacionados, que van de la sequía, a las plagas de insectos (como el descortezador) y enfermedades (Allen, 2009). En el estado de Tlaxcala la temperatura está incrementando y la precipitación pluvial está disminuyendo, de acuerdo al Programa Estatal de Acción Ante el Cambio Climático para el Estado de Tlaxcala (PEACC), publicado en 2014 (Morales-Acoltzi, et al. 2014). Lo que nos hace suponer que éste es uno de los factores que benefició la proliferación del escarabajo descortezador. Por otro lado, la disminución de la precipitación pluvial promedio anual, observada en el análisis de la estación meteorológica de Hueyotlipan por Montiel (2017), de 160 mm para el periodo 1960-1990, aunado al incremento de la temperatura máxima de 1.4°C de 1991 a 2012 (PEACC, 2014), está ocasionando que la vegetación esté en estrés hídrico y calórico, lo que la hace más vulnerable al ataque del escarabajo descortezador y otras plagas.

En relación con las montañas y su gran interés ecológico, la importancia de éste trabajo es analizar la disponibilidad y demanda de agua en espacio y tiempo de la cuenca Cañada

Grande, mediante el uso de modelos de simulación y métodos de sistemas de información geográfica, para fundamentar la toma de decisiones en la gestión sustentable de tan importante recurso.

Antecedentes

El volumen de agua del escurrimiento que se encuentra en la Cañada Grande es de 1,818,000 m³ de agua al año (INEGI, 2014), a este escurrimiento contribuyen los nacimientos de agua, que se encuentran a 3680 msnm. El agua que brota de esos nacimientos de agua está entubada desde hace varias décadas y ha sido aprovechada y colectada mediante canales rústicos por más de 300 años (Montero, 2012). A lo largo de esta tubería se encuentran 16 registros en forma de cubos de concreto donde los pobladores verifican que el agua fluya libremente. Estos registros eran prácticamente el único suministro del recurso hídrico para la fauna silvestre en la Cañada Grande. En el 2012, Nolasco *et al.* llevaron a cabo un estudio en esos registros, reportando que operaban como trampas ecológicas para algunas especies de aves, principalmente paseriformes. Como respuesta a la privación del recurso hídrico para la biodiversidad, Nolasco *et al.* iniciaron un programa de restauración que consistió en la instalación de estanques artificiales a lo largo del gradiente altitudinal de Cañada Grande. Como resultado de esta acción se incrementó la riqueza y abundancia de aves en los sitios en los que fueron colocados los estanques. Posteriormente, se observó que también algunos mamíferos, como el gato montés, el coyote, el zorrillo y el mapache, acudieron a beber agua a esos estanques (Castro, 2018). Estos trabajos resaltaron la importancia del recurso hídrico para la fauna local.

Una forma de mitigar el conflicto entre la demanda de agua por parte de las poblaciones usuarias y el deterioro de los ecosistemas de las cuencas, es a través del análisis de la disponibilidad y demanda de agua y la posterior propuesta para la toma de decisiones en la gestión de este recurso. Esto es posible mediante el uso de modelos de simulación alimentados con información comúnmente obtenida de sistemas de información geográfica y enriquecida con información puntual histórica. Ejemplo de esto es el trabajo de Montilla *et al.* (2017), quienes realizaron un trabajo que simuló el comportamiento de un banco de agua activo para la reasignación de recursos hídricos entre los agricultores, considerando diferentes escenarios de

disponibilidad de agua de la cuenca de Guadalquivir, España. Para lo cual ocuparon modelos de programación matemática. Concluyeron que el banco para reasignación de recursos hídricos entre los regantes en periodos de sequía resultó ser una herramienta adecuada para la gestión pública del agua en dicha cuenca, minimizando los adversos económicos y sociales asociados a este periodo de escasez.

La modelación de sistemas dinámicos adaptativos es una metodología útil para la creación de modelos de simulación que permitan el diseño de escenarios, compuestos por diversas estrategias y la valoración de sus resultados en el sistema. En última instancia, se muestra como una valiosa herramienta para los tomadores de decisiones en la gestión del agua. Un ejemplo concreto de esto, es el trabajo de Martínez y Vargas (2016), quienes usaron modelos dinámicos para analizar los diferentes escenarios tendenciales de la demanda de agua en zonas urbanas y conurbanas, de la zona metropolitana de Puebla, simulando diversas combinaciones hasta lograr un escenario realista, en una proyección de 15 años, con la posibilidad de revertir el déficit actual. Usaron técnicas de modelación que representen de modo adecuado al sistema y su cambio en el tiempo, bajo diferentes escenarios de variación natural y estrategias de intervención. Otro ejemplo del uso de modelos de simulación es el de Salazar y Pineda (2010). Ellos realizaron un estudio sobre la demanda de agua en México, en el que encontraron que el aumento en el ingreso de la población a las grandes ciudades trae aparejado un incremento de la demanda de agua, lo cual, sugieren, debe tomarse en cuenta en la planeación de las necesidades del recurso en especial en regiones con alto crecimiento económico.

Un ejemplo más del uso de modelos lo hacen Blanco *et al.* en el 2020, donde desarrollaron un modelo considerando distintos escenarios futuros que les permitió determinar las aportaciones de agua en la Cuenca Alta del Río Negro (Uruguay). Tomaron en cuenta las características hidrogeológicas de las cuencas y variables de cambio climático. Concluyeron que los modelos hidrológicos son una herramienta valiosa en la gestión de los recursos porque son utilizados para elaborar estrategias adecuadas en la asignación del agua, analizar la viabilidad de proyectos y evaluar situaciones medioambientales. Ya que el agua constituye un recurso escaso y existe una competencia por su uso, debido al aumento poblacional, el desarrollo socioeconómico y los modos de consumo.

También, utilizando modelos matemáticos, Suarez *et al.*, 2009, reportaron una disponibilidad de agua promedio per cápita para el estado de Tlaxcala de 1,165 m³ por habitante por año para el 2005, con una reducción a 874 m³ por habitante por año para el 2015, lo que ubica al estado de Tlaxcala en la categoría de región geográfica con estrés hídrico, por lo que es apremiante realizar estudios que permitan gestionar este recurso de manera sustentable. En otro trabajo, Breña y Breña en el 2007, calcularon la disponibilidad natural media de agua por habitante en un año dividida en 13 regiones geográficas del país, considerando que es un indicador fundamental para evaluar la situación de los recursos hídricos de una cuenca hidrológica. Evaluaron que, con relación a la disponibilidad, existe una escasez extrema cuando es menor a mil metros cúbicos por habitante por año, valor que limita drásticamente las posibilidades de desarrollo. La disponibilidad presenta una escasez crítica si su valor se encuentra entre mil y mil 700 metros cúbicos por habitante por año, situación en la cual es necesario tomar medidas urgentes para preservar el recurso. Se tienen disponibilidades bajas y medias si los valores oscilan entre mil 700 y 5 mil metros cúbicos por habitante por año y 5 mil y 10 mil metros cúbicos por habitante por año, respectivamente. Si las magnitudes son superiores a 10 mil metros cúbicos por habitante por año, se considera que hay una disponibilidad alta.

El aumento de la población y el crecimiento económico han intensificado la presión sobre el suministro de agua, provocando un estrés hídrico. Se espera que el cambio climático agrave los problemas de suministro de agua si no se implementan intervenciones urgentes como el trabajo de Olabanji *et al.* (2020), quienes evaluaron los impactos del cambio climático en la disponibilidad y demanda de agua en la cuenca del río Olifants en Sudáfrica y evalúan en qué medida una combinación de estrategias de gestión puede mitigar los impactos actuales y a largo plazo, utilizando el modelo de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP). Los resultados mostrados por dos escenarios de cambio climático proyectados, exponen un aumento de la temperatura de aproximadamente 1 °C – 4 °C y una disminución de la precipitación del 5 % a 30 %, en comparación con el clima de referencia de 1976–2005. Los resultados también manifestaron que la presión sobre el suministro de agua debido al aumento de las actividades económicas y la disminución del caudal, aumentarán la demanda de agua en un 58 % y un 80

% para los períodos de mediados y finales de siglo, respectivamente. Los resultados revelaron, además, que se espera que la combinación de medidas de gestión propuestas por los tomadores de decisiones, reduzca la futura demanda insatisfecha de agua. Por lo tanto, el estudio concluye que la combinación de estrategias de gestión brinda una solución mucho mejor y más eficiente a los problemas de escasez de agua en la cuenca en comparación con la dependencia de una sola estrategia.

Como lo menciona en su trabajo Chamizo-Checa (2020), una de las fortalezas de WEAP es que es adaptable a cualquier información disponible para describir un sistema de recursos hídricos. Es decir, puede usar series de datos diarios, semanales, mensuales o anuales para caracterizar los suministros de agua y demandas del sistema. Esta flexibilidad significa que se puede aplicar en un rango de escalas espaciales y temporales.

El realizar modelos para conocer o predecir el comportamiento de la disponibilidad de agua es importante, pero se deben considerar también otros aspectos como en el trabajo de Monterroso-Rivas *et al.* (2016), donde evaluaron mediante balances hídricos, el potencial de recarga hídrica para el acuífero de la zona noreste del estado de Hidalgo, México, perteneciente a la cuenca del Río Moctezuma, considerando variables que aportan humedad en las cuencas (precipitación y precipitación horizontal), así como aquellas en las que se utiliza el agua (evapotranspiración) o ésta sale del sistema (escurrimiento). Reportaron que la demanda por evapotranspiración de las plantas es el componente que utiliza mayor cantidad de agua, además, es el que presenta mayores variaciones con los escenarios de cambio climático. Estiman que el potencial de infiltración equivale a $620 \times 10^6 \text{ m}^3$, pero es posible que se reduzca desde 70% y hasta 100% para 2050.

Aunado a todo esto, es importante anteceder trabajos en la zona de estudio (PNLM) de este trabajo que nos permitan conocer un poco del estado que se encuentra la región, como en el trabajo de Llaguno-Méndez *et al.* (2009), quienes evaluaron climogramas de 7 estaciones meteorológicas dentro del PNLM y encontraron una disminución de la precipitación media anual desde 20 mm hasta 80 mm para los periodos 1985-1995 y 1995-2005, respectivamente, mostrando que, en solo 20 años es significativa la disminución de la precipitación, por efecto

del cambio climático global. Por otro lado, Pérez y cols. en 2018, elaboraron un diagnóstico socioeconómico de las poblaciones aledañas al PNLN en el que discuten que a pesar de ser un ANP, los habitantes de estas poblaciones hacen uso de los recursos naturales, representando un capital natural importante. Los autores consideran que el consumo excede a su renovación y que la recuperación puede ser irreversible, con lo cual se dificulta la conservación y manejo correcto de esta área natural.

Por otro lado, no solo se ve afectada la recuperación de las ANPs por consecuencia de las poblaciones, como lo reportan Mc Dowell y cols. en el 2008, mencionando que el estrés hídrico crónico y prolongado debilita y termina matando los árboles, ya sea directamente por privación de carbono, o indirectamente debido a los ataques de plagas, como el escarabajo del pino de montaña, que aniquilan las defensas ya disminuidas de estos árboles.

Justificación

Es necesario considerar que existen tres problemas críticos con respecto al uso de agua: el incremento en la demanda, un mayor uso en las actividades primarias y la disminución en su calidad (Toledo, 2002), situación que provoca una menor disponibilidad de agua tanto en zonas urbanas como rurales (Gil Antonio et. al., 2014).

Los escurrimientos del volcán de la Malinche ascienden a 430 m³/ha por año, infiltrando cerca de 150 Mm³ de agua al año en toda la montaña; que impacta directamente en 10 municipios del estado de Tlaxcala y cuatro municipios del estado de Puebla, con un total 800,000 habitantes (Llaguno et al., 2006). Los resultados de este trabajo, orientados hacia el respeto del ciclo hidrológico en su forma natural, garantizan la disponibilidad de agua para estos municipios.

Se ha observado un decremento en la precipitación de la región del volcán la Malinche en los últimos 30 años, que aunado a un crecimiento poblacional de tasas superiores al 3% anual en las comunidades aledañas (Ixtenco y Pilares), demandarán mayor cantidad de agua, por ello, es necesario simular el comportamiento de la disponibilidad y demanda de agua, en la microcuenca de la Cañada Grande, para proyectar los posibles escenarios de escasez de agua,

para el abastecimiento del ecosistema bosque, así como para el uso doméstico, con la ayuda de las herramientas de modelaje, ya que se desconoce en muchos casos el comportamiento del uso del agua en las ANP.

La gestión sustentable del recurso agua en la microcuenca Cañada Grande, debe fundamentarse en un buen diagnóstico, del ciclo hidrológico (precipitación, escorrentía, precipitación y evapotranspiración), así como de las demandas naturales y de los asentamientos humanos de la zona, para generar escenarios con diferentes tipos de asignaciones del recurso y dotar a los tomadores de decisiones, de conocimiento y herramientas fiables, para optimar este recurso.

Este trabajo proporcionará a los tomadores de decisiones una herramienta que les permita evaluar diferentes opciones que satisfagan el abastecimiento de agua para las poblaciones usuarias del recurso hídrico, Ixtenco y Pilares, así como para la recuperación y mantenimiento de la biodiversidad de Cañada Grande del PNLM.

Los conocimientos generados en este trabajo, sobre las metodologías e información de la Cañada Grande, aparte de servir para sustentar la gestión sustentable del recurso agua en esta zona, podrán ser utilizados para otras microcuencas del PNLM, así como a otras zonas de montaña en el país.

Hipótesis

Actualmente, la demanda de agua para los manantiales de Cañada Grande, por parte de las poblaciones de Ixtenco y Pilares, tiene un déficit en la disponibilidad de agua en la época de estiaje y un superávit en la época de lluvia.

El uso de otras fuentes de abastecimiento de agua para las poblaciones de Ixtenco y Pilares, como serían pozos y reservorios de agua de escorrentías, entre otros, tendrán que implementarse, debido a que el incremento de la población, se reflejará en un incremento en la demanda de agua y la disminución de la precipitación por el cambio climático global, impactará en una merma de la disponibilidad. Por lo cual es factible proponer la liberación del agua de los manantiales hacia

el canal natural de la Cañada Grande, para beneficiar al ecosistema ahora y no esperar hasta que la naturaleza ejerza su presión.

El uso de modelos de simulación permitirá encontrar los valores óptimos de asignación de agua para la gestión sustentable del recurso hídrico en esta microcuenca.

Objetivos

Evaluar la disponibilidad y demanda de agua de la Cañada Grande de la Malinche, en espacio y tiempo, mediante el uso de modelos de simulación y métodos de sistemas de información geográfica, para generar información que permita fundamentar la toma de decisiones en la gestión sustentable del recurso agua en ésta y otras microcuencas y regiones de la Malinche.

Específicos

En la microcuenca de Cañada Grande:

- Caracterizar la microcuenca mediante el uso de métodos de sistemas de información geográfica, para fundamentar los parámetros del modelo de simulación.
- Estimar la disponibilidad de agua de la microcuenca mediante el uso de modelos de simulación.
- Estimar el abastecimiento de agua de los manantiales de la microcuenca, para las poblaciones de Ixtenco y Pilares, utilizando sensores de efecto doppler.
- Utilizar modelos de simulación para realizar el balance hídrico de la microcuenca.
- Generar escenarios y proyecciones para la microcuenca en relación a la gestión sustentable de la demanda de agua para el medio natural y las comunidades de Ixtenco y Pilares.

Metodología

Para evaluar la disponibilidad y demanda de agua en la microcuenca de la Cañada Grande del PNLN, se estimaron los siguientes parámetros:

Caracterización de la microcuenca:

- Curva hipsométrica
- Altura media
- Pendiente del canal principal
- Red de drenaje
- Longitud de los escurrimientos
- Número de escurrimientos
- Longitud del río principal
- Orden de la cuenca
- Relación de bifurcación
- Densidad de drenaje
- Densidad hidrológica
- Perfil transversal y longitudinal
- Delimitación
- Tipo de cuenca
- Clases de corrientes
- Sistema de drenaje
- Parámetros hidrográficos
- Área
- Perímetro
- Forma
- Índice de compacidad
- Longitud
- Relación de elongación
- Relieve
- Pendiente

❖ Precipitación

Para la obtención de información de precipitación se utilizaron imágenes *raster*, con información de la precipitación acumulada anual para el periodo 1998–2019, utilizada para estimar los años hidrológicos y acumulada mensual para el año 2019 (año base). Se determinaron los años hidrológicos con las siguientes categorías:

- Muy húmedos
- Húmedos
- Normales
- Secos
- Muy secos

Las imágenes contaron con una resolución espacial de 0.21 grados y fueron obtenidas del servidor GIOVANNI-NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), éste es la interfaz web de la NASA que provee información de varios satélites para todas las zonas del mundo. Los datos ya están procesados y pueden ser descargados en la escala requerida. Posteriormente a la obtención de las imágenes *raster*, se procesarán en el software QGIS versión 3.4.

❖ **Evapotranspiración:**

Para la obtención de información de la evapotranspiración se utilizaron imágenes *raster*, con información de la evapotranspiración acumulada por mes para el año 2019 (año base). Estas imágenes cuentan con una resolución espacial de 1 grado y también se obtuvieron del servidor GIOVANNI (NASA). Los datos ya están procesados y pueden ser descargados en una escala requerida; posteriormente a la obtención de las imágenes *raster*, se procesarán en el software QGIS versión 3.4.

❖ **Cubierta vegetal y uso de suelo:**

La información geoespacial correspondiente al uso de suelo y vegetación (USV), se obtuvo a través del geoportal de INEGI (disponible en línea). La información vectorial correspondiente al USV se obtuvo de las series disponibles en dicha plataforma, se utilizó la Serie VI 2014-2017 (año de referencia 2014). De igual manera, se obtuvo la información vectorial complementaria para la caracterización del área de estudio (Modelo Digital de Elevación, edafología, climas, geología, fisiografía y la división política del área de estudio). La información vectorial se procesó con el software QGIS versión 3.4.

❖ **Escorrentía:**

La escorrentía se dividió en 2 tipos: escorrentía intermitente (que dependerá de las precipitaciones) y escorrentía permanente (que depende del agua de los manantiales, la cual baja por una tubería hasta las comunidades). Para determinar la escorrentía intermitente, se utilizó un sensor de efecto Doppler. Éste se colocó en el punto de aforo de la microcuenca (19°14'40.36"N - 97°59'8.28"O) donde se estimó el área del perfil del canal y se calculó el gasto con la siguiente fórmula:

$$(A_t) (V_t) = Q_t$$

Dónde:

A_t = es el área del perfil del canal en m^2 al tiempo t .

V_t = es la velocidad del caudal al tiempo t en m/s .

Q_t = es el gasto del caudal al tiempo t en m^3/s .

Los muestreos se realizaron en los meses de lluvia (junio, julio, agosto y septiembre del año 2020), en 20 días elegidos al azar, colocando el sensor de efecto doppler a la mitad del canal, con anticipación a la precipitación, durante el tiempo que duró la escorrentía.

La escorrentía permanente se midió con el mismo sensor de efecto doppler, el cual se colocó en cada uno de los tubos que suministra agua a las comunidades. El muestreo fue por 12 horas y cada media hora se tomó el registro de la altura del agua en el tubo mediante una regla, con un intervalo de 13 días respectivamente a cada tubo.

Se colocaron 4 puntos de muestreo, 2 en los tubos que conducen el agua a la población de Pilares y 2 en los tubos que llevan el agua a la comunidad de Ixtenco, en las siguientes coordenadas para la parte superior: $19^{\circ}14'5.81''N$, $98^{\circ} 1'21.88''O$ para Ixtenco, $19^{\circ}14'5.58''N$, $98^{\circ} 1'23.58''O$ para Pilares, para la parte inferior fueron: $19^{\circ}14'39.48''N$, $97^{\circ}59'26.95''O$ para Ixtenco y $19^{\circ}14'41.17''N$, $97^{\circ}59'26.50''O$ para Pilares. Posteriormente los datos se procesaron en Excel y se graficaron para analizar el comportamiento del gasto del agua de cada tubo que la conduce a cada comunidad, con lo que se obtuvo la aproximación de la disponibilidad y demanda de agua.

❖ **Infiltración:**

Para evaluar el comportamiento hidráulico del suelo, se utilizó la fórmula de K de McCuen (2004) con la ayuda de los mapas de geología, edafología, fisiología, cubierta vegetal y uso de suelo.

Con esta ecuación se estimó la infiltración y se verificó con la ecuación de balance de agua:

$$I = P - E - ETP$$

Donde:

I = Infiltración

P = precipitación

E = escorrentía

ETP = evapotranspiración

Para calcular el gasto de agua de las poblaciones de Ixtenco y Pilares se realizaron visitas a cada población y se realizaron entrevistas referentes a qué uso le destinan al agua, si contaban con algún pozo de agua y cuántos habitantes hacen uso del agua entubada que baja desde los manantiales; al realizar estas encuestas pudimos conocer cuántos habitantes dependen de esta agua.

Elaboración del modelo de simulación de la disponibilidad y demanda de agua para la microcuenca de la Cañada Grande en el PNLM

Se utilizó la siguiente metodología (Grant et al., 2001):

Etapa 1. Desarrollo del modelo conceptual

- ▶ Definir los objetivos del modelo.
- ▶ Definir los límites del sistema de interés.
- ▶ Clasificar los componentes del sistema de interés.
- ▶ Identificar las relaciones entre los componentes del sistema.
- ▶ Representación formal del modelo conceptual.
- ▶ Describir los patrones esperados del modelo

Etapa 2. Desarrollo del modelo cuantitativo

- ▶ Seleccionar la forma matemática general para el modelo
- ▶ Elegir el intervalo de tiempo para las simulaciones
- ▶ Identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo
- ▶ Estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo

- ▶ Codificar las ecuaciones del modelo
- ▶ Ejecutar las simulaciones de referencia
- ▶ Presentar las ecuaciones del modelo

Etapa 3. Evaluación del modelo.

- ▶ Evaluar la estructura del modelo y las relaciones representadas en él.
- ▶ Evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados.
- ▶ Evaluar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real.
- ▶ Determinar la sensibilidad del modelo a cambios en parámetros importantes.

Etapa 4. Uso del modelo.

- ▶ Desarrollar y ejecutar el diseño experimental para las simulaciones
- ▶ Analizar e interpretar los resultados del modelo
- ▶ Examinar las políticas de manejo o las condiciones ambientales alternativas (generación de escenarios).
- ▶ Comunicar los resultados de las simulaciones

Modelo de Simulación en WEAP

El balance hídrico se elaboró para el período enero – diciembre de 2019, definido como año base en función de ser el que mayor información para el modelo tenía, en forma de fichas y/o gráficos. Su objetivo es simular el comportamiento de la disponibilidad y demanda del agua en distintas fases del ciclo hidrológico en función de las variables de precipitación, infiltración, escorrentía y evapotranspiración. Se utilizó el software *Water Evaluation And Planning System* (WEAP) creado en 1988, con el propósito de ser una herramienta de planeación flexible, integral y transparente, para evaluar la sustentabilidad de los patrones actuales de demanda y suministro de agua, así como explorar escenarios alternativos de largo alcance. En el cuadro 1 se muestra la información requerida para la calibración del modelo.

Componente		
Área de captación	Uso del suelo	Delimitación de la microcuenca y sus unidades hidrológicas.
		Los tipos de uso de suelo (bosque, agricultura, etc.) y sus áreas por unidad hidrológica.
		El Kc (coeficiente de producción) para cada tipo de uso de suelo.
		Precipitación efectiva. La precipitación disponible para la evapotranspiración.
	Clima	Precipitación. Precipitación pluvial mensual en mm. De preferencia para cada unidad hidrológica..
		ETref (Evapotranspiración de referencia): Evapotranspiración para cada tipo de uso de suelo.
	Escurrimiento e infiltración	Porcentaje de flujos por escurrimiento e infiltración, para cada unidad hidrológica. Los datos pueden ser mensuales o anuales.
Acuífero	Capacidad de almacenamiento m ³ . Almacenamiento inicial m ³ . Recarga Natural m ³ .	
Año hidrológico	Información histórica anual y mensual de la precipitación (de preferencia más de 30 años)	
Sitios de Demanda	Uso del agua	Nivel de actividad anual (uso doméstico): número de habitantes de la microcuenca.
		Tasa de uso anual de agua (uso doméstico): cantidad necesaria por habitante por año. En m ³
		Variación mensual: para cada tasa de usos anual de agua se puede incluir su variación mensual en porcentaje.
		Porcentaje de agua consumida. Agua que se pierde del sistema (ej. Fugas de tuberías de agua potable)
Tramos de río	Flujos	Flujo de la cabecera del río en MCS (metros cúbicos por segundo). Si no existe esta información se puede generar de los escurrimientos del área de captación de forma automática en el modelo.

Cuadro 1. Información requerida para calibrar el modelo de simulación de la disponibilidad y demanda de agua con WEAP.

Resultados

Caracterización de la microcuenca de la cañada grande de la Malinche:

La microcuenca de la Cañada Grande, se ubica entre las coordenadas 19° 13' 42.3" - 19°14' 55.9" de latitud Norte y 97° 56' 58.33" - 98°01' 55.9" de longitud Oeste (Figura 1). Se encuentra en el Parque Nacional La Malinche (PNLM), en los estados de Tlaxcala y Puebla.

Es una microcuenca exorreica, considerada muy pequeña por su área 7.2 km² según la clasificación de Campos (1987), su cauce principal es intermitente (ya que inmediatamente de brotar el agua de los manantiales es captada y transportada mediante tuberías), aunque por su origen debería ser permanente, tiene una longitud de 5.12 km y tiene 19 corrientes intermitentes, en un sistema de drenaje de tipo dendrítico (Figura 2); el perímetro de la microcuenca es de 14.7 km, con un índice de compacidad de 1.54, que la ubica en una microcuenca de forma oblonga a rectangular oblonga (K3).

De su área total, el 25.91% tiene cobertura de bosque de Pino, el 43.69% es de bosque de Oyamel, el 18.09% es de pradera de alta montaña, el 9.47% se encuentra desprovisto de vegetación y el 2.84% es de pastizal inducido (Figura 3) (capas de uso de suelo y vegetación 1:250 000, serie VI, INEGI 2014). El rango de altitud en la microcuenca va de 3073 a 4408 msnm.

El canal principal tiene una pendiente promedio de 26% con un relieve de 1335 m. La forma de su curva hipsométrica, la clasifica como una microcuenca geológicamente joven (Figura 4).

Los tipos de suelo predominantes en la microcuenca son el Regosol 10.45%, Litosol 52.43% y Fluvisol 37.12% (Figura. 6). El clima de la microcuenca en su mayoría es frío, en la parte baja es semi-frío con verano fresco y largo (Figura 8).

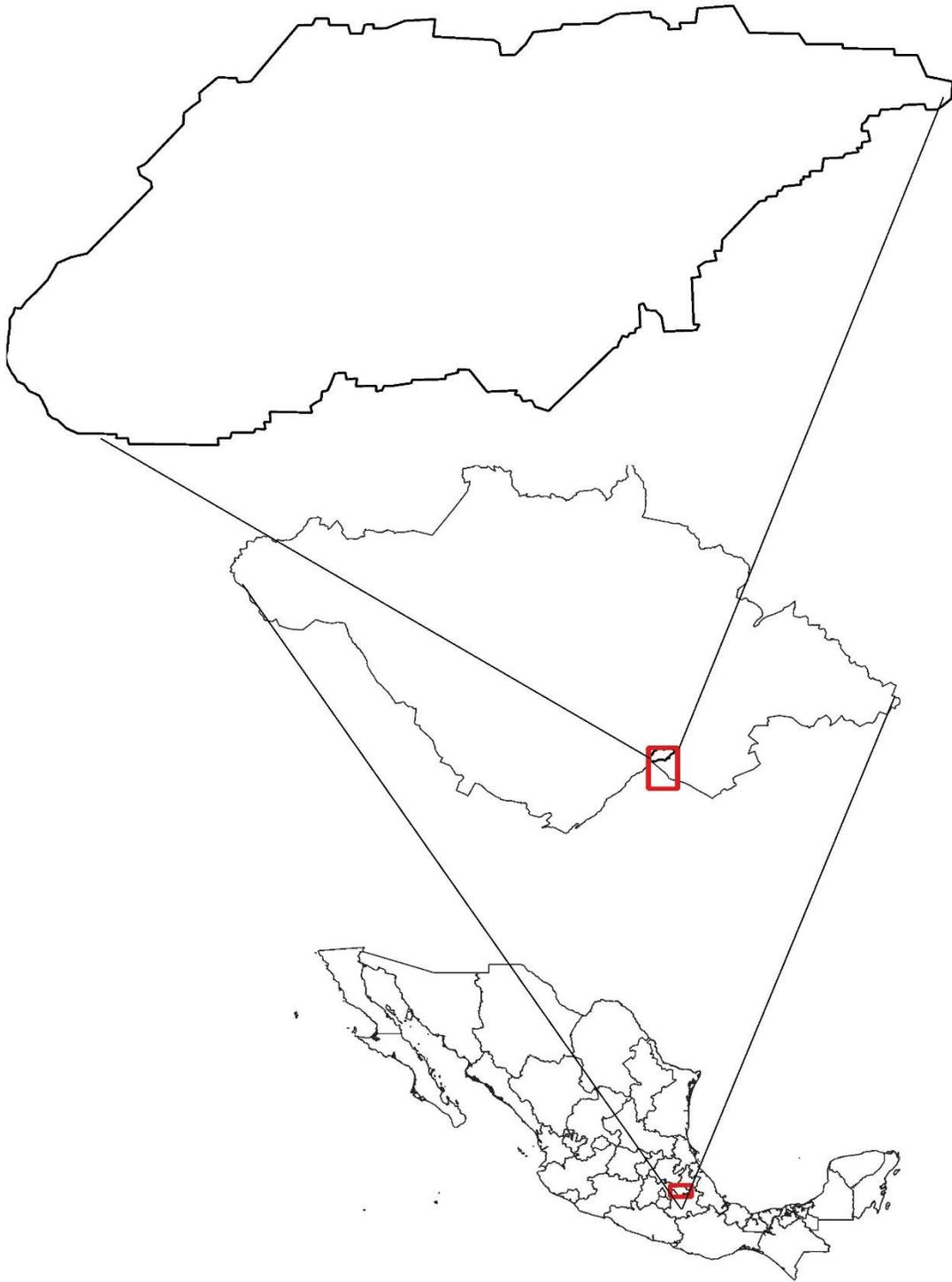


Figura 1. Ubicación geográfica de la microcuenca Cañada Grande, en el estado de Tlaxcala, México

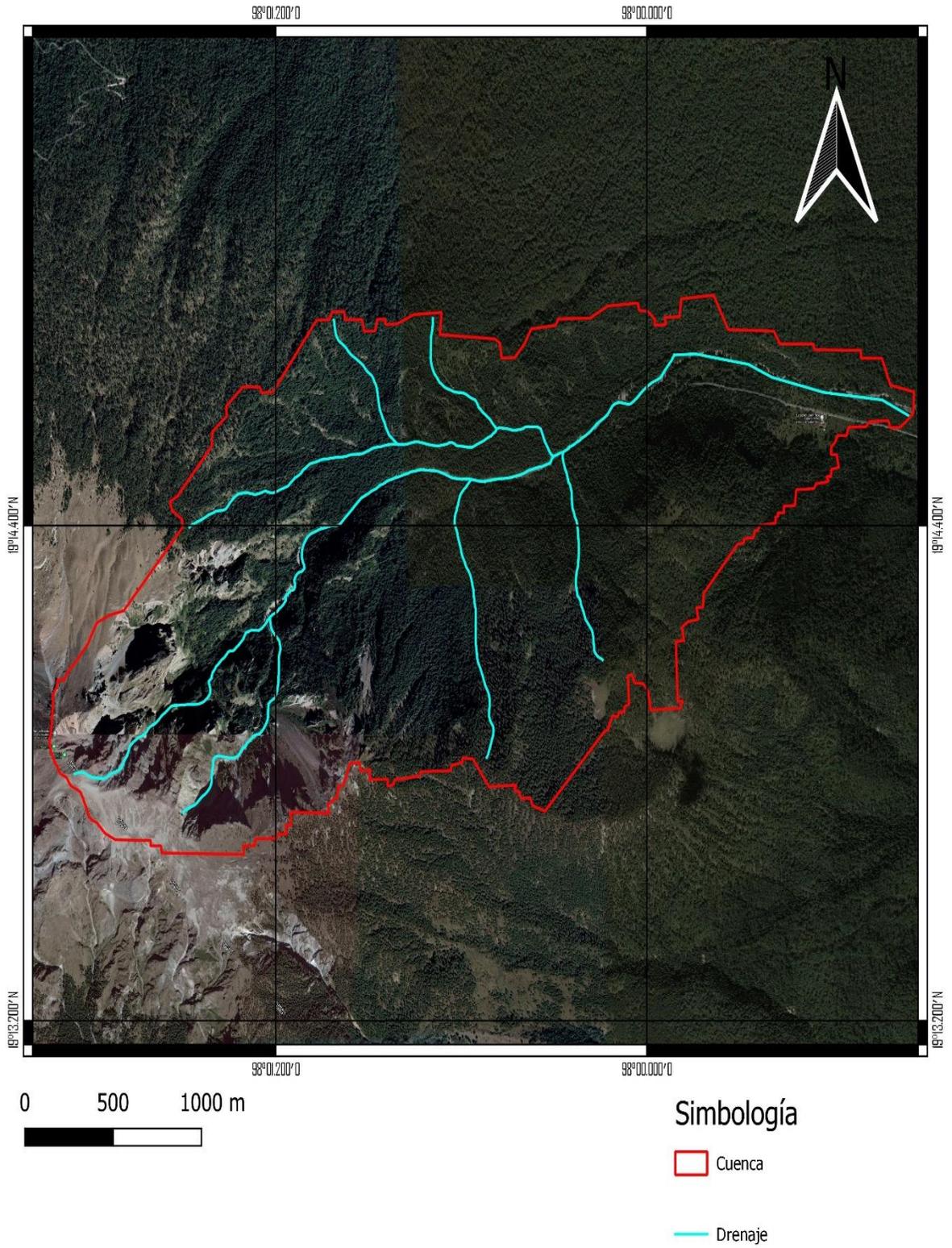


Figura 2. Sistema de drenaje de la microcuenca de Cañada Grande del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

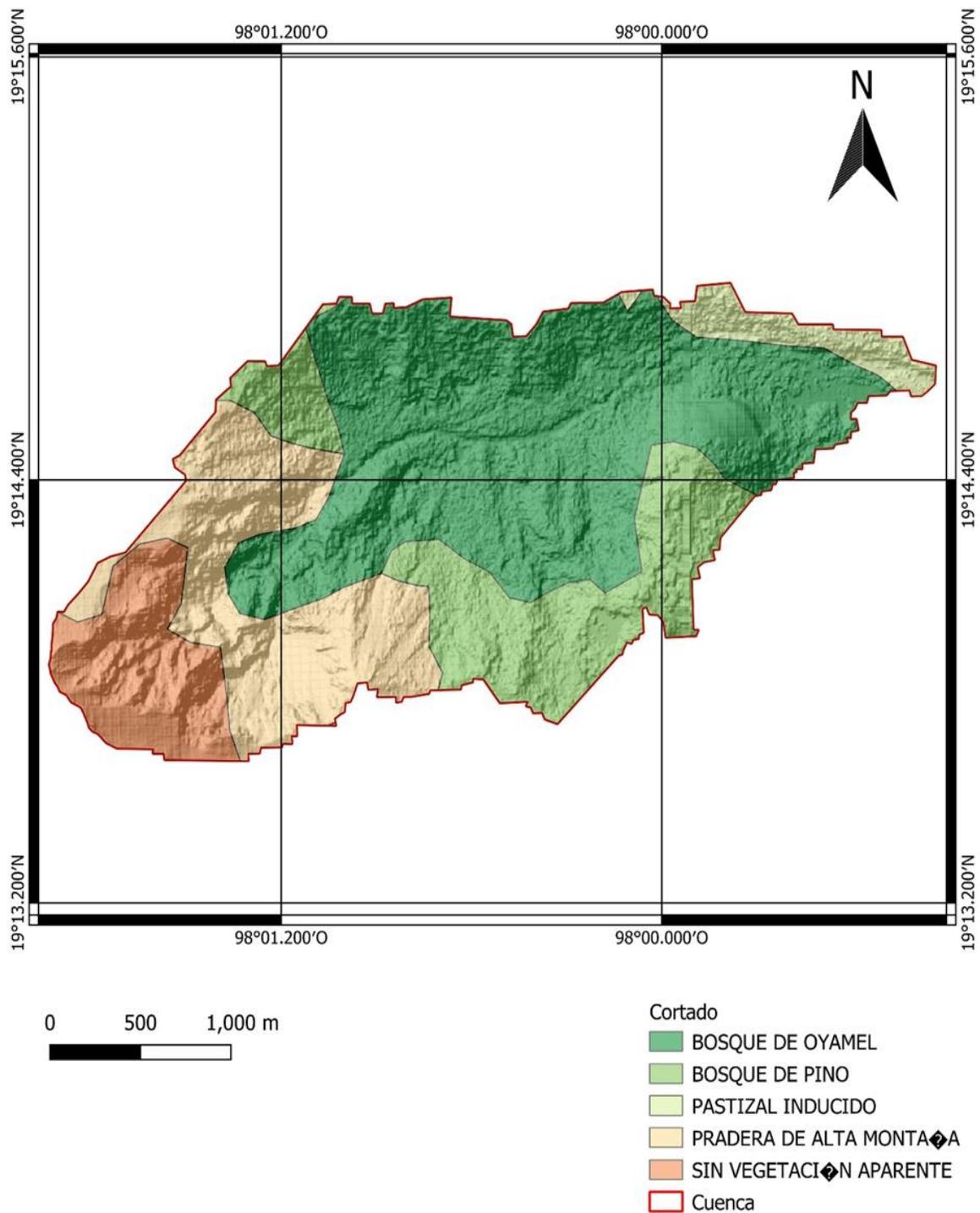


Figura 3. Uso del suelo y vegetación para el año de 2014 en microcuenca Cañada Grande, del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

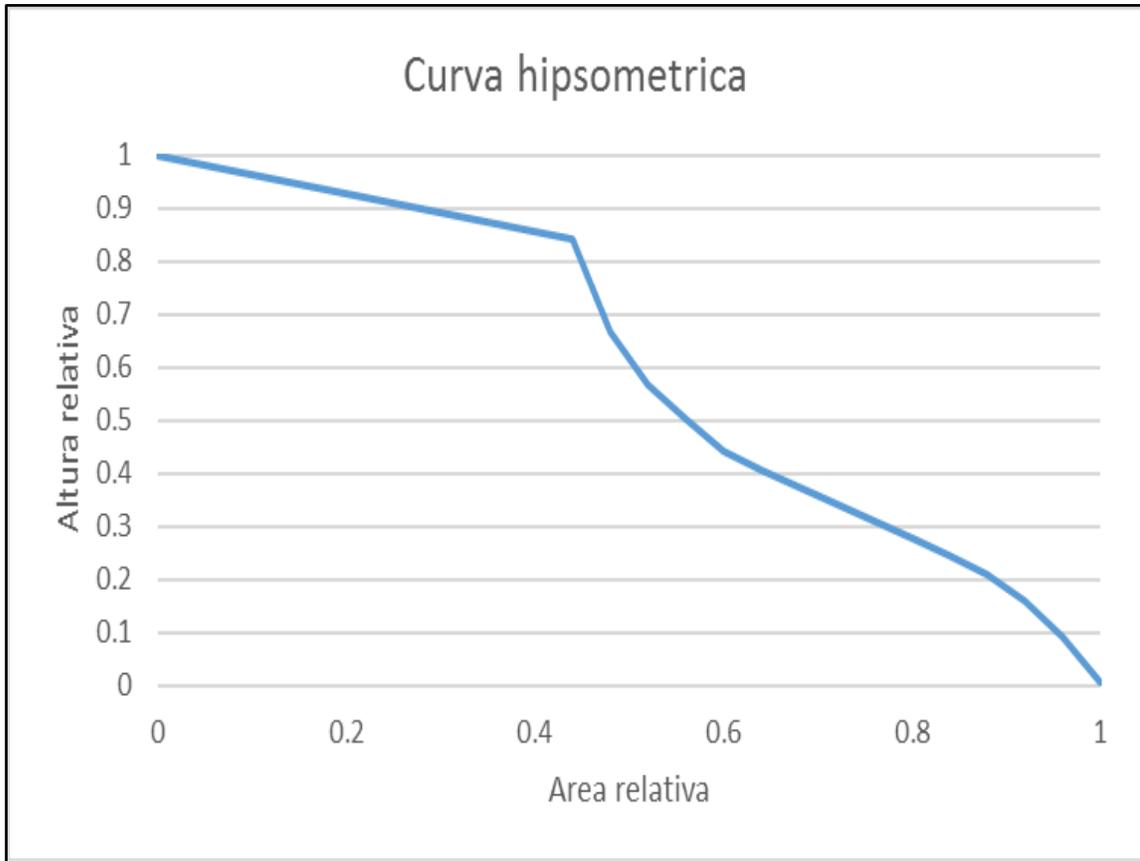


Figura 4. Curva hipsométrica de la microcuenca Cañada Grande en el PNL, Tlaxcala.

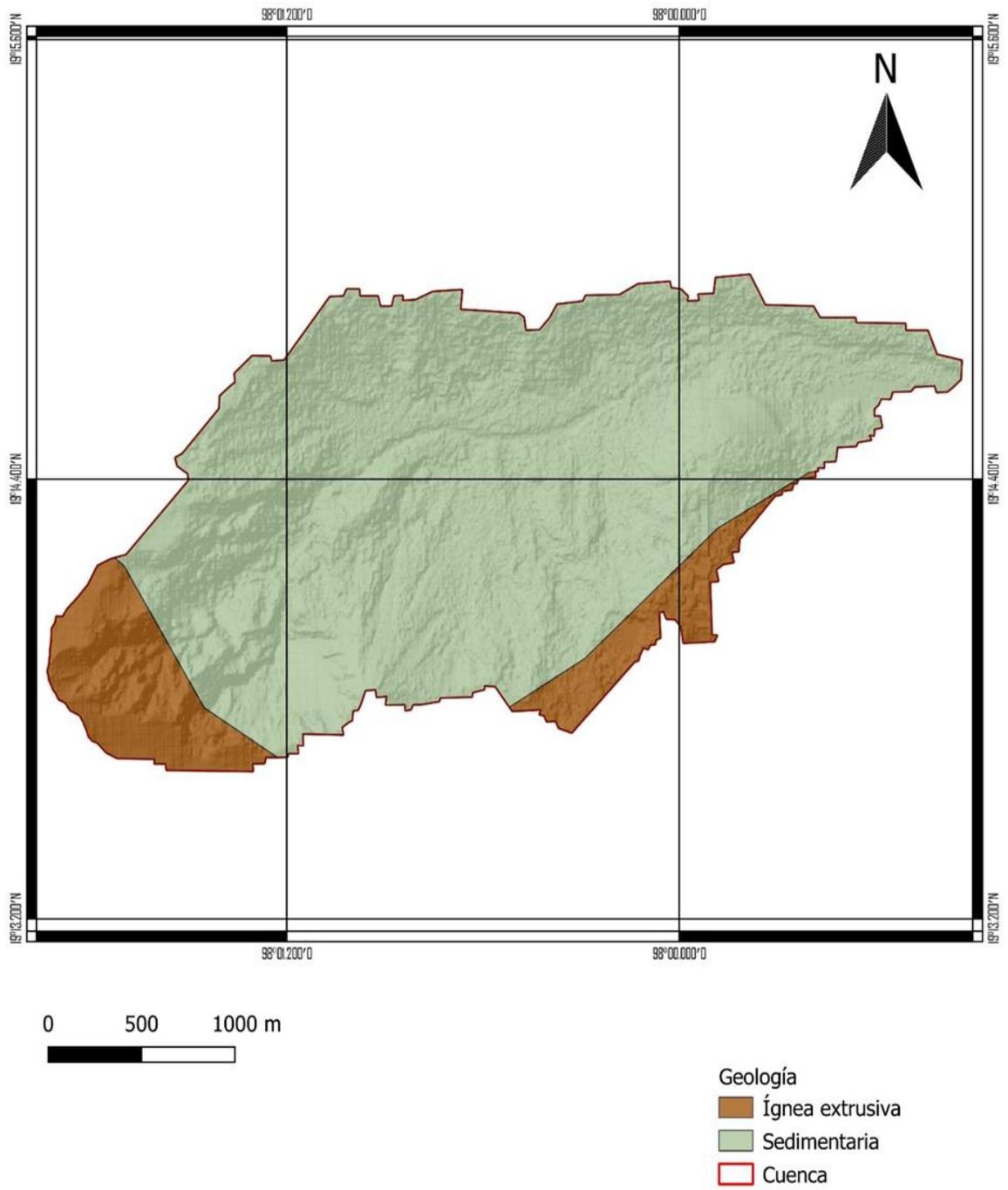


Figura 5. Geología de la microcuenca Cañada Grande del PNLM, Tlaxcala.

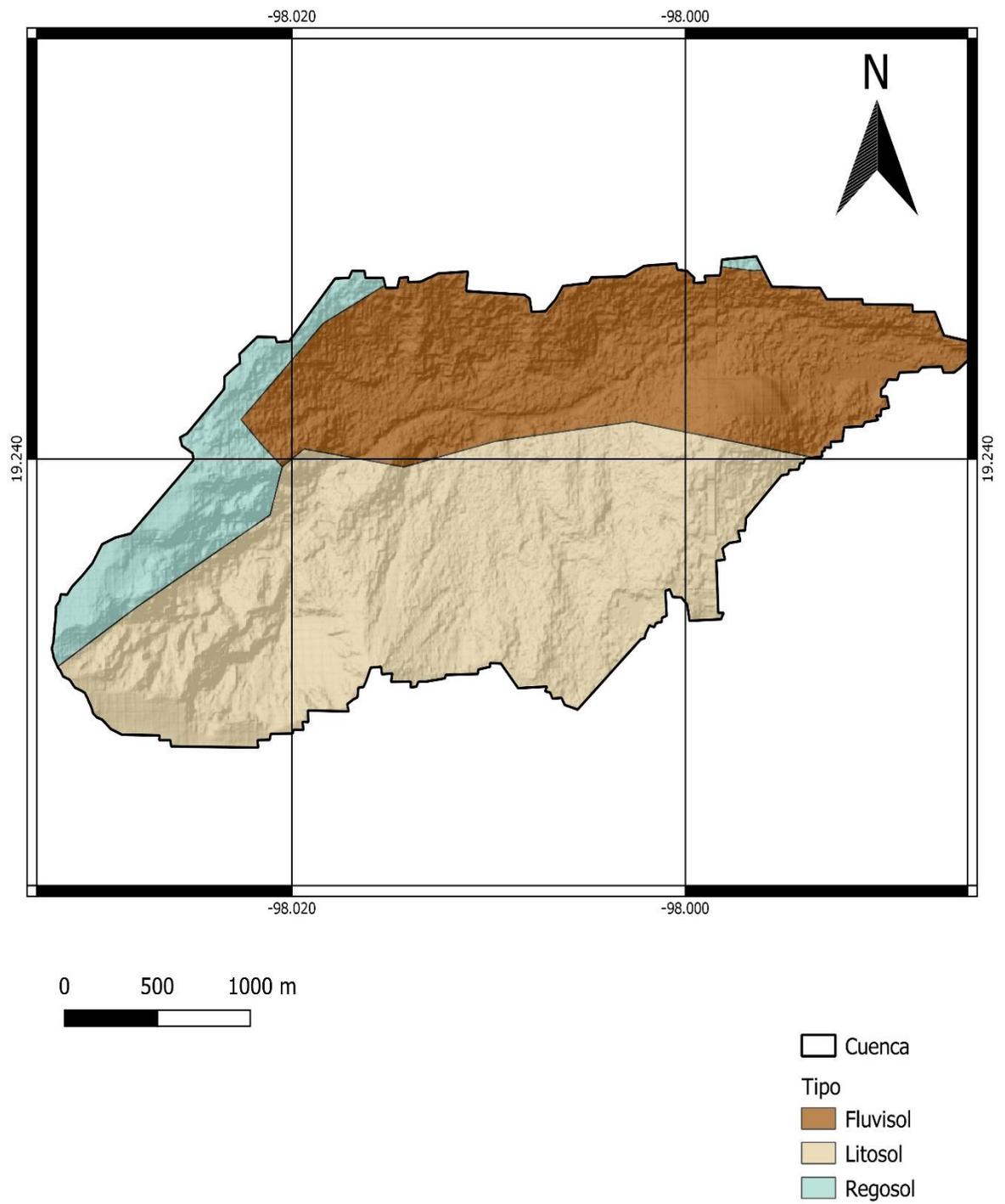


Figura 6. Edafología de la microcuenca de Cañada Grande del PNLM, Tlaxcala.

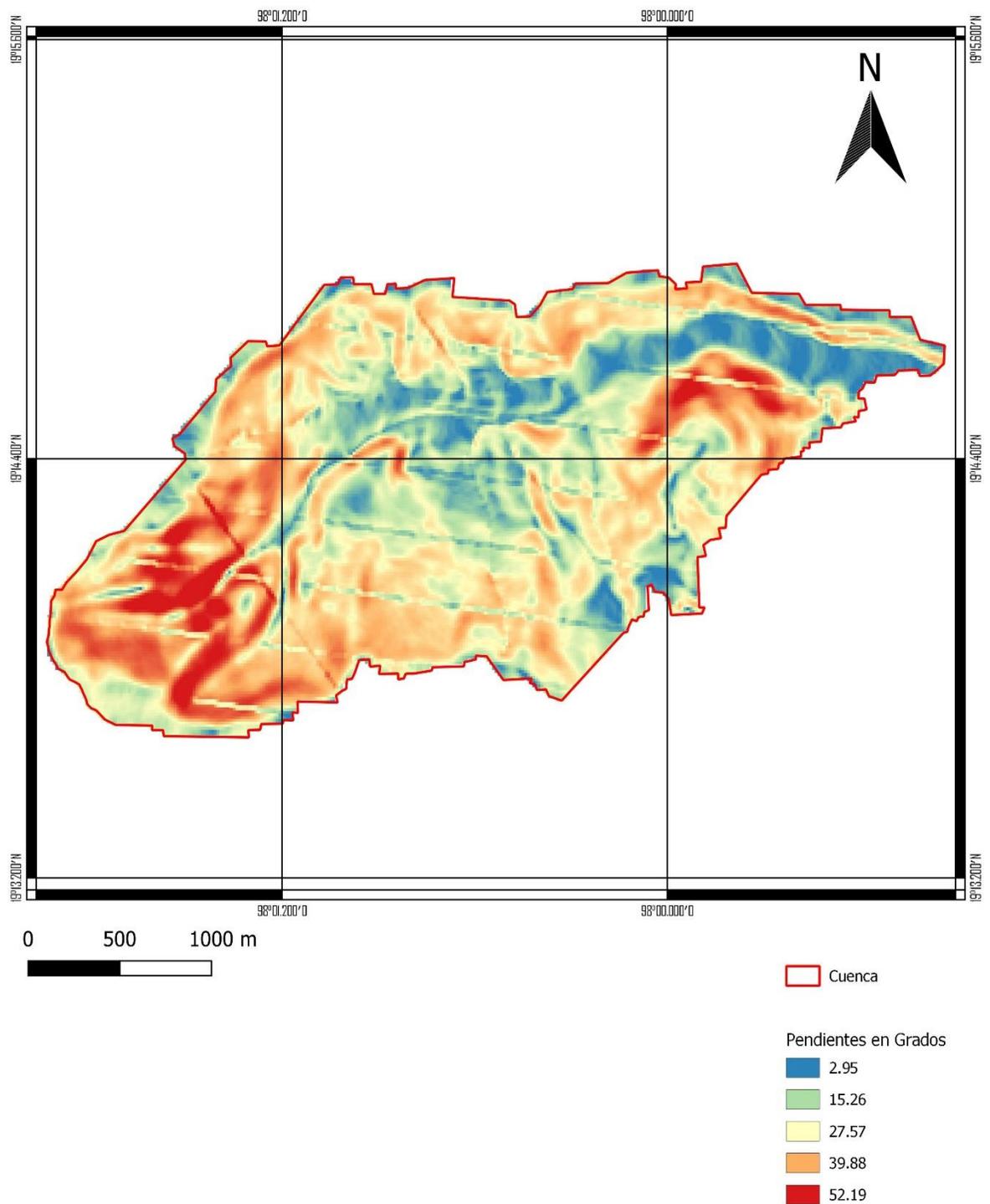


Figura 7. Pendientes (grados), de la microcuenca Cañada Grande del PNLM, Tlaxcala.

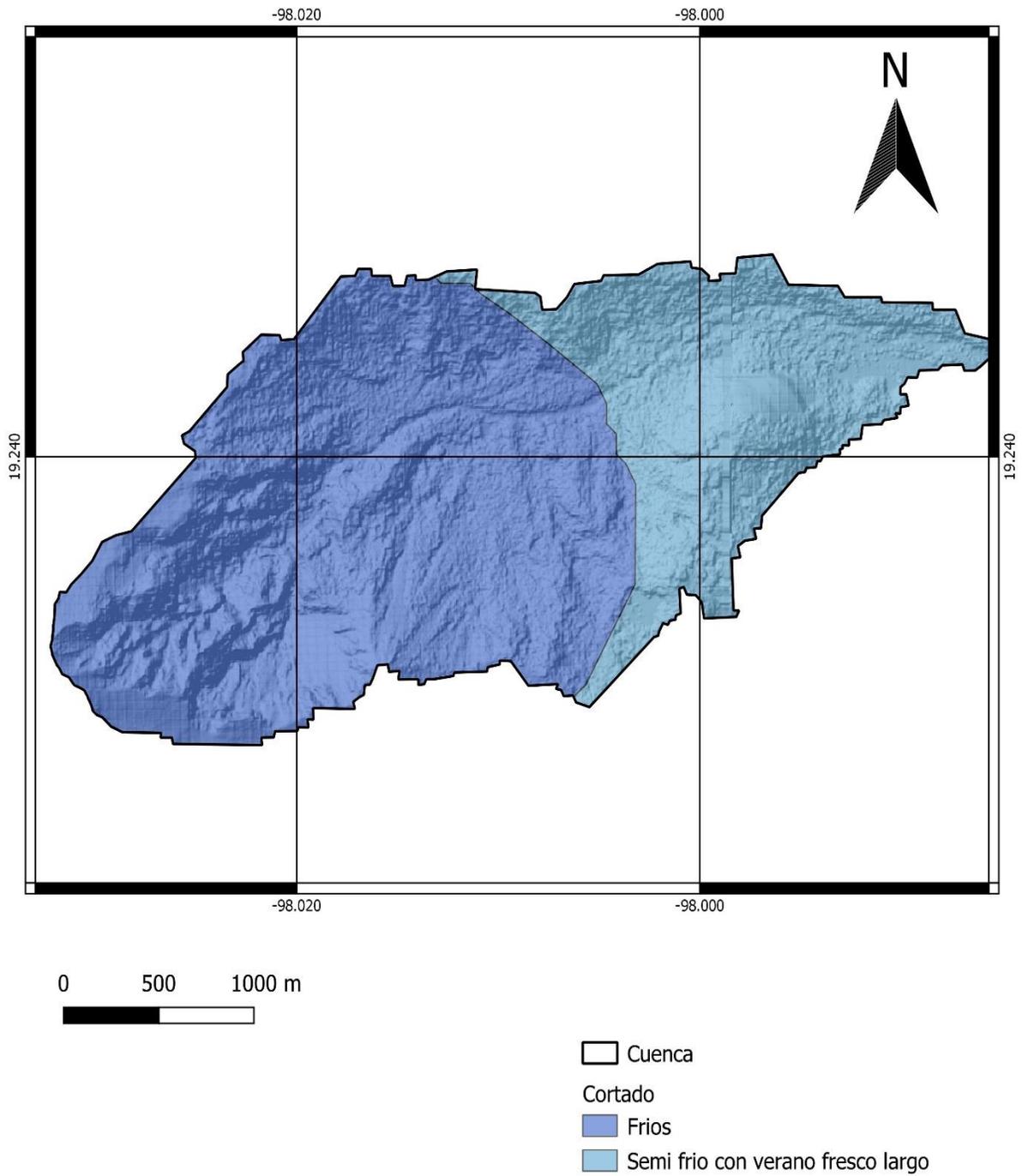


Figura 8. Climas de la microcuenca Cañada Grande del PNLM Tlaxcala. Basado en la clasificación de Köppen.

Modelos de simulación de la disponibilidad y demanda de agua de la microcuenca de Cañada Grande del Parque Nacional La Malinche.

En este apartado se describen los modelos de la simulación de la demanda de agua en dos partes, el primero desde el modelo Stella, basado en la Norma Oficial Mexicana Nom-011-CONAGUA-2015, y el segundo es el modelo elaborado en WEAP, con los elementos de la microcuenca.

a) Modelo Stella

Se elaboró la estructura del modelo en Stella, basado en la NOM-011-CONAGUA-2015, para calcular la disponibilidad de agua de la microcuenca de Cañada Grande (Figura 9).

El modelo fue alimentado con los datos recabados en las salidas de campo y con los datos obtenidos mediante los cálculos de mapas satelitales.

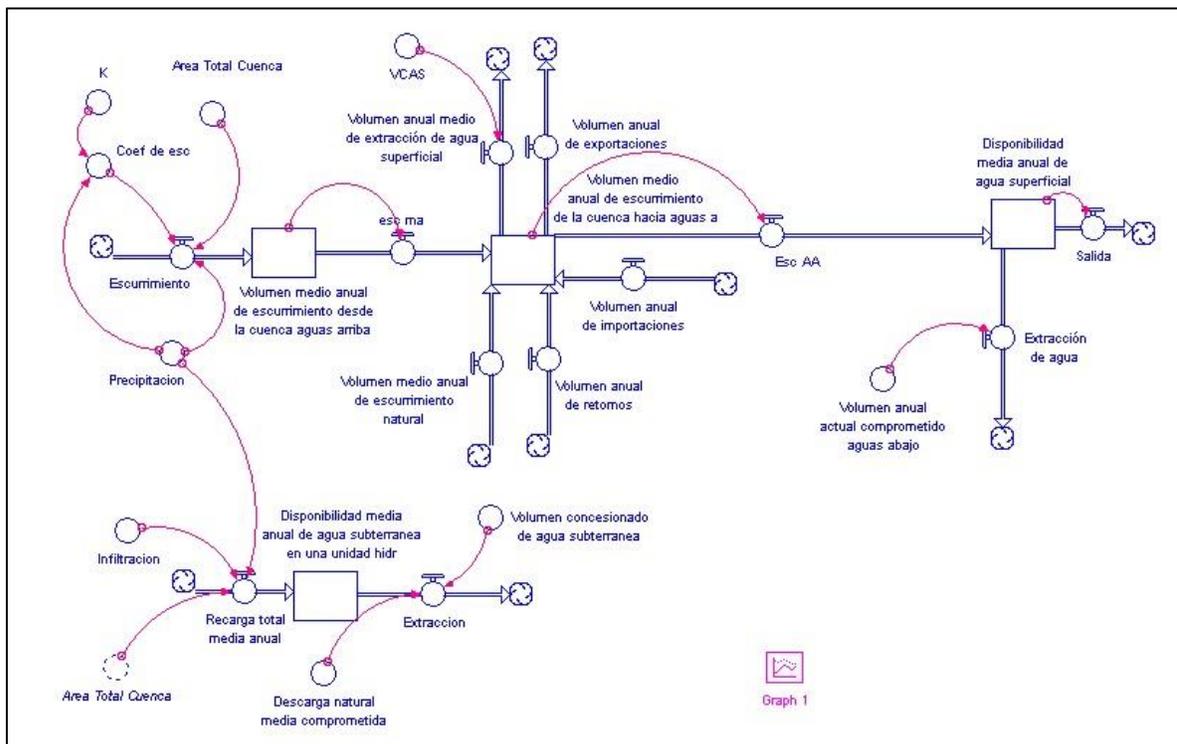


Figura 9. Modelo de la NOM-011-CONAGUA-2015 en Stella para calcular la disponibilidad media anual de agua en una cuenca.

Donde la vulnerabilidad media anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba, está en función del área de la cuenca, la precipitación y el coeficiente de escurrimiento (C_e), este último se estima a partir de la precipitación y el coeficiente K (su valor depende del tipo y uso de suelo). La disponibilidad media anual de agua subterránea de una unidad hidrológica, está en función de la precipitación, el área total de la cuenca y la infiltración, así como de la extracción, determinada con el volumen concesionado de agua subterránea y la descarga natural media comprometida. El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo, depende volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba, más el volumen medio anual de escurrimiento natural, más los volúmenes anuales de agua de retorno y de importaciones, menos el volumen medio anual de extracción de agua superficial (en función del volumen concesionado de aguas superficiales) y el volumen anual de exportaciones. Por lo que la disponibilidad media anual de agua superficial resulta del volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo, menos el volumen anual comprometido aguas abajo (NOM-011-CONAGUA-2015).

Las estimaciones de escorrentía con el modelo estela, subestiman la escorrentía estimada con el modelo WEAP (calibrado con mediciones de campo), en un 24% menos.

- Disponibilidad_media_anual_de_agua_subterranea_en_una_unidad_hidr(t) = Disponibilidad_media_anual_de_agua_subterranea_en_una_unidad_hidr(t- dt) + (Recarga_total_media_anual - Extraccion) * dt
INIT Disponibilidad_media_anual_de_agua_subterranea_en_una_unidad_hidr = 0
INFLOWS:
 - ☞ Recarga_total_media_anual = Area_Total_Cuenca_*Precipitacion*Infiltracion/1000
 OUTFLOWS:
 - ☞ Extraccion = Descarga_natural_media_comprometida+Volumen_concesionado_de_agua_subterranea
- Disponibilidad_media_anual_de_agua_superficial(t) = Disponibilidad_media_anual_de_agua_superficial(t- dt) + (Esc_AA - Extracción_de_agua - Salida) * dt
INIT Disponibilidad_media_anual_de_agua_superficial = 0
INFLOWS:
 - ☞ Esc_AA = Volumen_medio__anual_de_escurrimiento__de_la_cuenca_hacia_aguas_a
 OUTFLOWS:
 - ☞ Extracción_de_agua = Volumen_anual_actual_comprometido_aguas_abajo
 - ☞ Salida = Disponibilidad_media_anual_de_agua_superficial
- Volumen_medio_anual_de_escurrimiento_desde_la_cuenca_aguas_arriba(t) = Volumen_medio_anual_de_escurrimiento_desde_la_cuenca_aguas_arriba(t- dt) + (Escurrimiento - esc_ma) * dt
INIT Volumen_medio_anual_de_escurrimiento_desde_la_cuenca_aguas_arriba = 0
INFLOWS:
 - ☞ Escurrimiento = Area_Total_Cuenca_*Precipitacion*Coef_de_esc/1000
 OUTFLOWS:
 - ☞ esc_ma = Volumen_medio_anual_de_escurrimiento_desde_la_cuenca_aguas_arriba
- Volumen_medio__anual_de_escurrimiento__de_la_cuenca_hacia_aguas_a(t) = Volumen_medio__anual_de_escurrimiento__de_la_cuenca_hacia_aguas_a(t- dt) + (esc_ma + Volumen_medio_anual_de_escurrimiento_natural + Volumen_anual_de_retornos + Volumen_anual_de_importaciones - Volumen_anual_medio__de_extracción_de_agua_superficial - Esc_AA - Volumen_anual_de_exportaciones) * dt
INIT Volumen_medio__anual_de_escurrimiento__de_la_cuenca_hacia_aguas_a = 0
INFLOWS:
 - ☞ esc_ma = Volumen_medio_anual_de_escurrimiento_desde_la_cuenca_aguas_arriba
 - ☞ Volumen_medio_anual_de_escurrimiento_natural = 0
 - ☞ Volumen_anual_de_retornos = 0
 - ☞ Volumen_anual_de_importaciones = 0
 OUTFLOWS:
 - ☞ Volumen_anual_medio__de_extracción_de_agua_superficial = VCAS
 - ☞ Esc_AA = Volumen_medio__anual_de_escurrimiento__de_la_cuenca_hacia_aguas_a
 - ☞ Volumen_anual_de_exportaciones = 0
- Area_Total_Cuenca_ = 6.974
- Coef_de_esc = if K>0.15 then ((K*((Precipitacion-250)/2000))+((K-0.15)/1.5)) else K*((Precipitacion-250)/2000)
- Descarga_natural_media_comprometida = 141112
- Infiltracion = 0.063
- K = 0.24
- Precipitacion = 900
- timer = COUNTER(1,100)
- VCAS = 0
- Volumen_anual_actual_comprometido_aguas_abajo = 0
- Volumen_concesionado_de_agua_subterranea = 0

Figura 10. Descripción del modelo en Stella, basado en la NOM-011-CONAGUA-2015.

Modelo WEAP para simulación del balance de agua de la microcuenca de Cañada Grande en el PNLM

Considerando las características de la microcuenca, drenaje de la cuenca (Fig. 2), uso de suelo y vegetación (Fig. 3), edafología (Fig. 6) y clima (Fig. 8), se delimitaron tres unidades hidrológicas para el diseño del modelo WEAP para el análisis del balance de agua en la microcuenca.

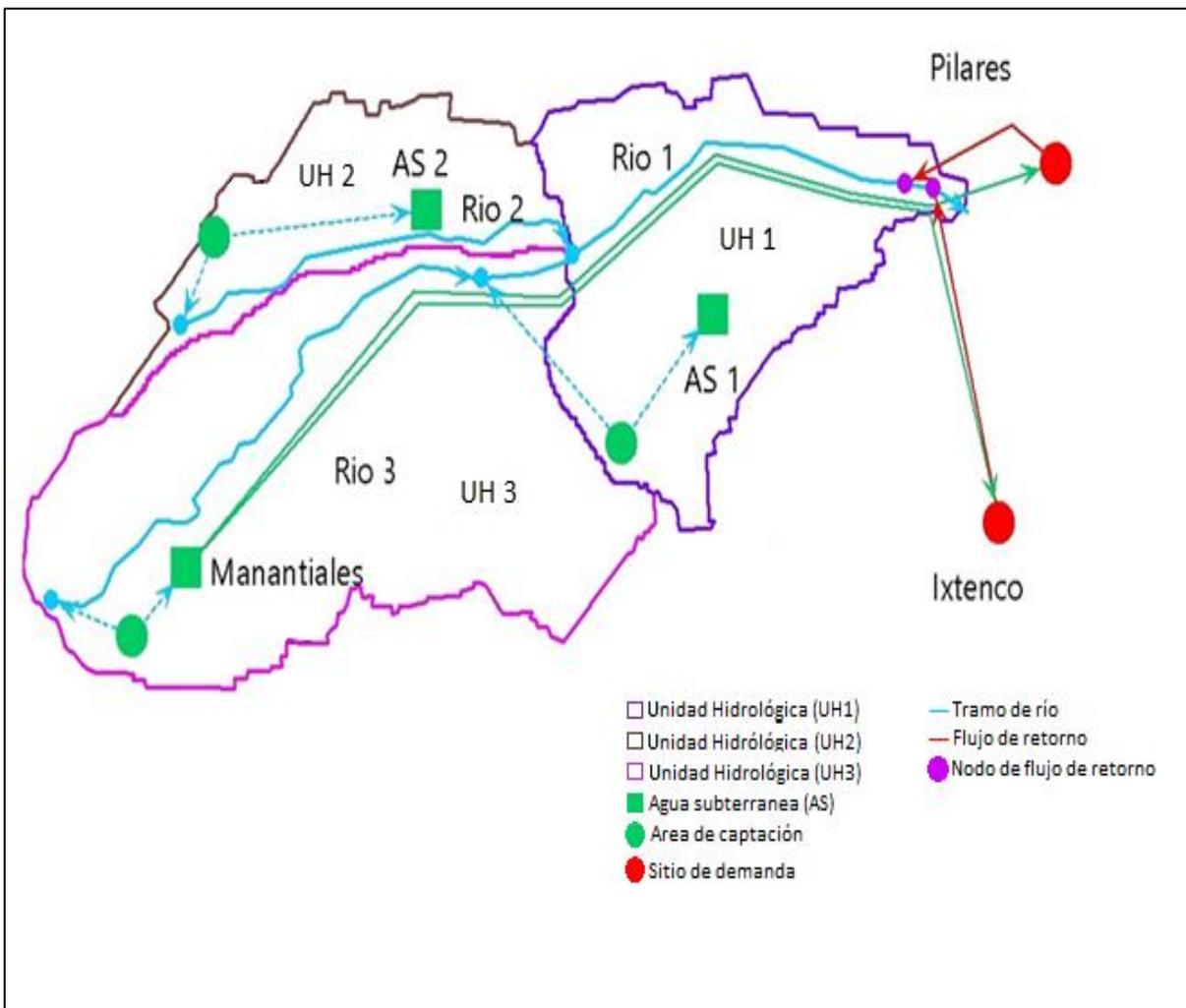


Figura 11. Estructura del modelo de simulación en WEAP para el balance de agua en la microcuenca de Cañada Grande del PNLM.

Unidad Hidrológica 1 (UH1): Se ubica al este de la cuenca en la parte más baja, tiene una superficie de 2.202 km², de la cual el 68% está cubierta de bosque de oyamel, el 19% de bosque de pino y el 13% de pastizal inducido.

Unidad Hidrológica 2 (UH2): Se ubica al norte de la cuenca, con una superficie de 1.052 km², de la cual el 65.78% está cubierta de bosque de oyamel, 17.3% de bosque de pino, 16.82% de pradera y 0.1% sin vegetación aparente.

Unidad Hidrológica 3 (UH3): Se ubica al sur en la parte más alta de la cuenca, con una superficie de 3.72 km², de la cual el 32.3% es bosque de oyamel, 31.4% es pradera, 17.98% es bosque de pino y 18.35% sin cubierta vegetal aparente.

Cada unidad hidrológica (UH), consta de un nodo de tramo de río, para representar las escorrentías; un nodo de agua subterránea y un nodo de área de captación, para representar la precipitación, infiltración, escorrentía y evapotranspiración. La UH 3 (Fig. 11), además tiene dos sitios de demanda, Pilares e Ixtenco, que entuban el agua de los manantiales que están ubicados en esa unidad y la conduce fuera de la microcuenca; para fines de cálculo, se incluyen un flujo de retorno para cada sitio de demanda, que conducen el agua utilizada al final del tramo de río de la UH 1.

Simulación de la precipitación

Del análisis de la precipitación pluvial acumulada anual del periodo de 1998 a 2019, se observa que ocurre en un rango de 4 a 6.7 millones de m³, lo que permite caracterizar los tipos de año en Muy seco, Seco, Normal, Húmedo y Muy húmedo; los años secos tienen la mayor probabilidad de ocurrencia (32%).

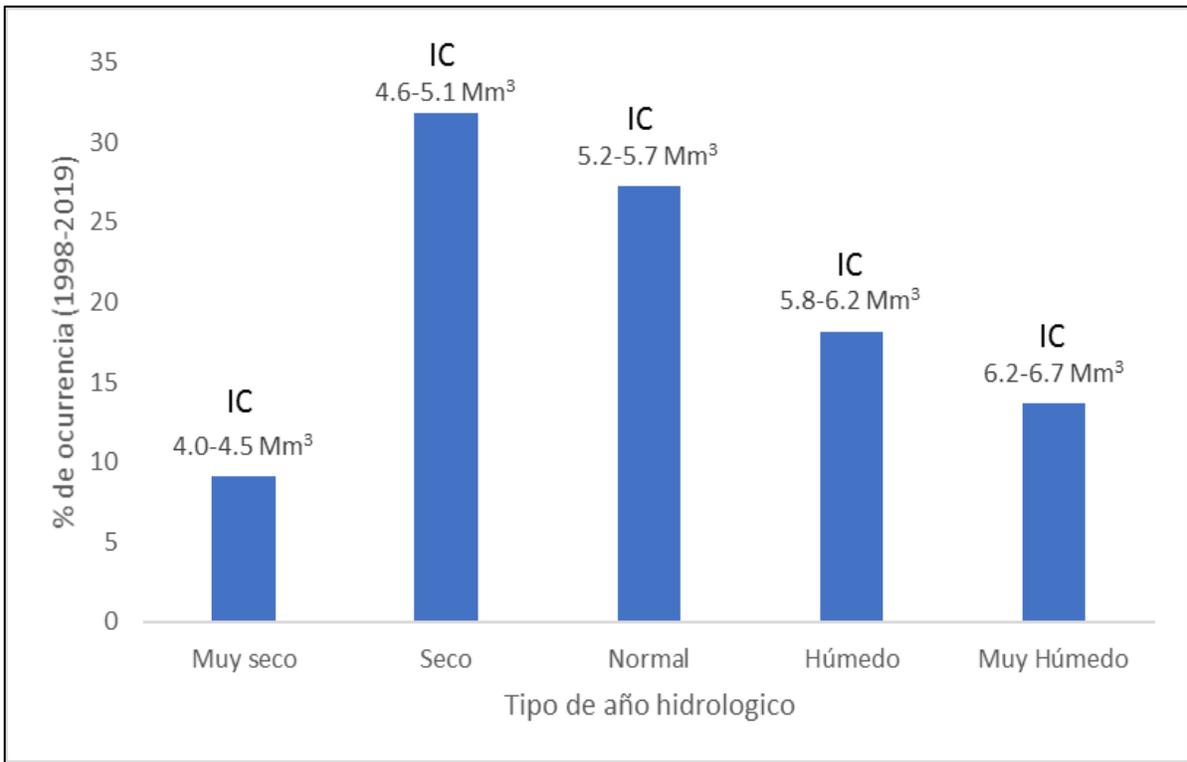


Figura 12. Clasificación de años hidrológicos calculada con información de precipitación acumulada anual del periodo 1998 a 2019.

IC = Intervalo de Clase

La precipitación pluvial en el periodo de enero a diciembre de 2019 para la cuenca de La Cañada fue de 4.65 millones de m³, por lo que año base (2019) está clasificado como año seco, su distribución mensual se observa en la Figura 13, con un periodo de lluvia de 5 meses de junio a octubre y valores mínimos de precipitación en los meses restantes, por ello la escorrentía en las unidades hidrológicas se dan en los meses de lluvia. En función de su área, la UH 3 es la que capta más agua de lluvia acumulada anual (2.09 millones de m³), en segundo lugar, la UH 1 capta 1.88 millones de m³ y la que menos capta es la UH 2 (0.68 millones de m³).

Evapotranspiración

El 68.6% del agua precipitada se evapotranspira, aunque la UH 3 recibe mayor precipitación pluvial, es la UH 1 la que más evapotranspira (1.41 millones de m³), en segundo lugar, la UH 3

(1.3 millones de m³) y la UH 2 es la que menor cantidad de agua evapotranspira (0.48 millones de m³). Estos comportamientos se deben a que las UH 1 y 2, tienen una cubierta de bosque de más del 80% de su área, mientras que la UH 3, tiene solamente el 50% de cubierta vegetal de bosque.

Infiltración

Se infiltró el 6.3% del agua precipitada en la cuenca, la UH 3 infiltró el 53.9 del total infiltrado en la cuenca, la UH 1 el 32.1% y la UH 2 el 14%. Valores proporcionales al área de cada UH.

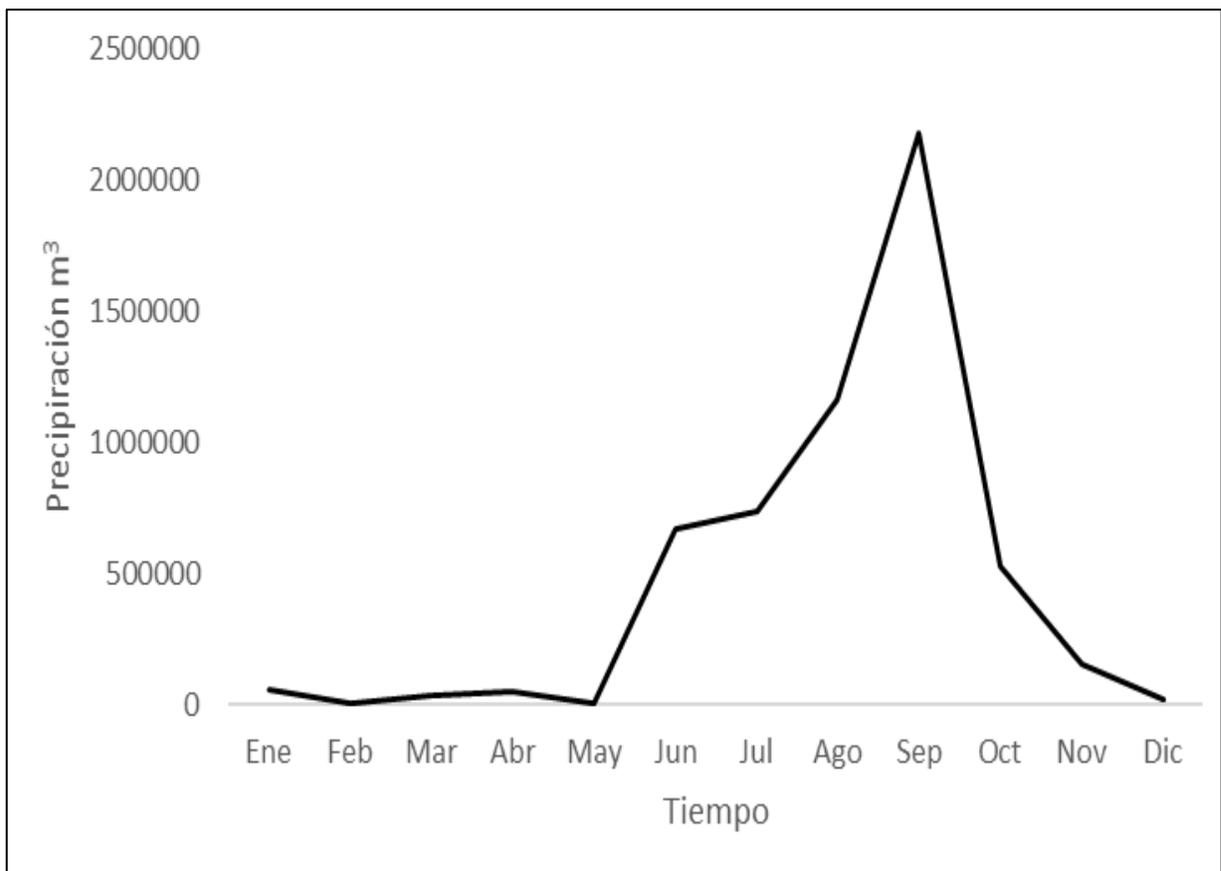


Figura 13. Precipitación mensual acumulada en millones de m³, para la cuenca de La Cañada, para el año 2019.

Escorrentía

El 25.1% del agua que se precipita en la cuenca se escurre, la escorrentía por UH es proporcional a su área, así la UH 3 es la que más agua escurre (54%), después la UH 1 (32%), finalmente la UH 2 (14%). Los valores fueron corroborados con tres mediciones en campo de la escorrentía.

Por otro lado, los manantiales escurren en promedio 141,112 m³ al año, que representa el 12% del total de escorrentía por lluvia; el agua de los manantiales es entubada, el 33.4% se conduce a Ixtenco, para abastecer a 150 personas aproximadamente y el resto se conduce a Pilares para abastecer a 1,682 personas. Cabe mencionar que la demanda de agua para Ixtenco es de 47,131 m³ anuales, por lo que se conduce 188% más del agua demandada; mientras que Pilares demanda 93,981 m³ anuales y solamente recibe el 41% de esta demanda. Además, estas demandas se ven incumplidas temporalmente por la variabilidad anual que tienen los gastos de los manantiales (Figs. 14 y 15).

En las Figura 14 y 15, se muestra el gasto diario de agua de las poblaciones (Ixtenco y Pilares), que hacen uso del recurso hídrico de los manantiales de la Cañada Grande, en un periodo de un año (octubre de 2020 a septiembre de 2021). Donde se observa que el gasto para la población de Ixtenco, es menor y casi homogéneo durante el año, observándose una disminución considerable en los meses de agosto y septiembre, debido a problemas en la tubería de conducción. Por otro lado, el gasto para la población de Pilares, es mayor en casi un 50% y es casi homogéneo durante el año, a excepción del mes de agosto que registró un pico de 60% con relación al resto del año.

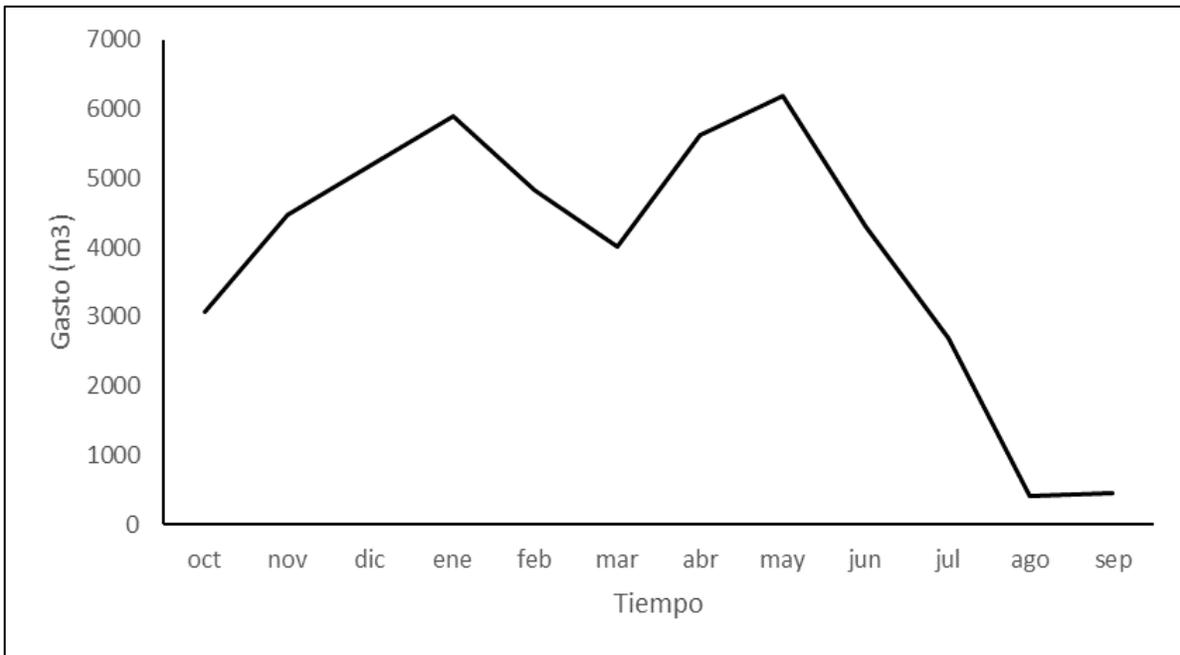


Figura 14. Gasto promedio mensual de agua para la población de Ixtenco, Tlaxcala, durante el periodo octubre 2020 a septiembre de 2021.

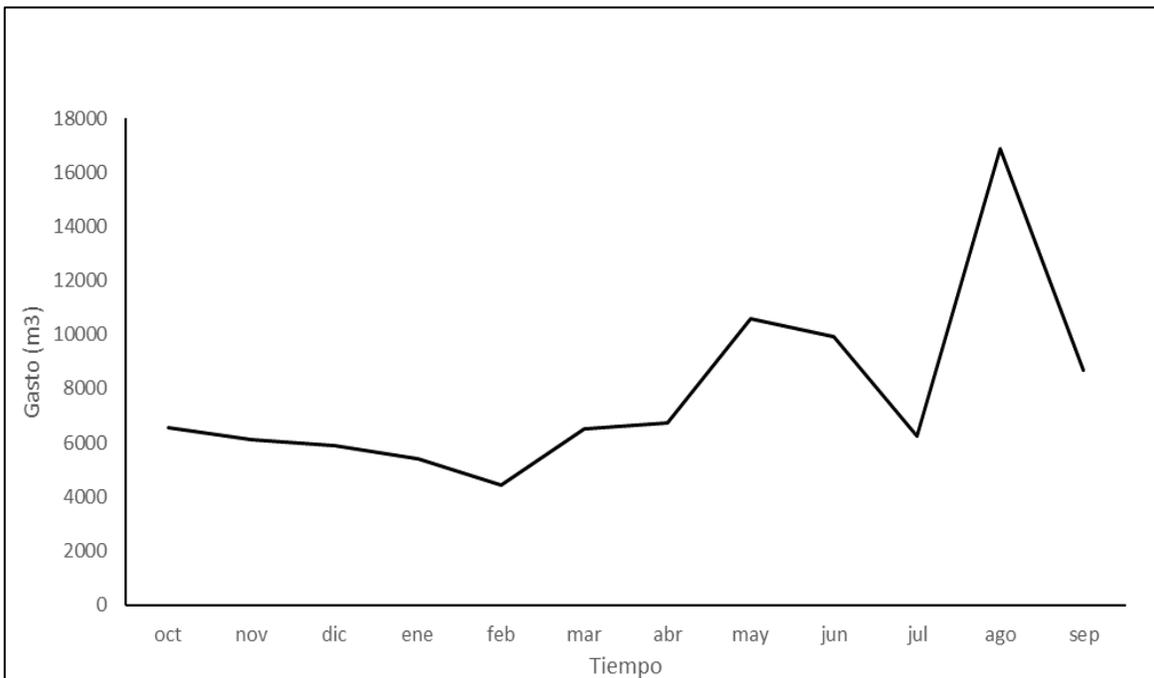


Figura 15. Gasto promedio mensual de agua para la población de Pilares, Tlaxcala, durante el periodo octubre 2020 a septiembre de 2021.

Balance de agua del año base (2019)

En la Figura 16, se muestra el balance de agua del año base (2019) de la cuenca, de la Cañada Grande del PNLM, donde se observa que los mayores valores en precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración, se da en los meses de junio a noviembre y es septiembre el mes de.

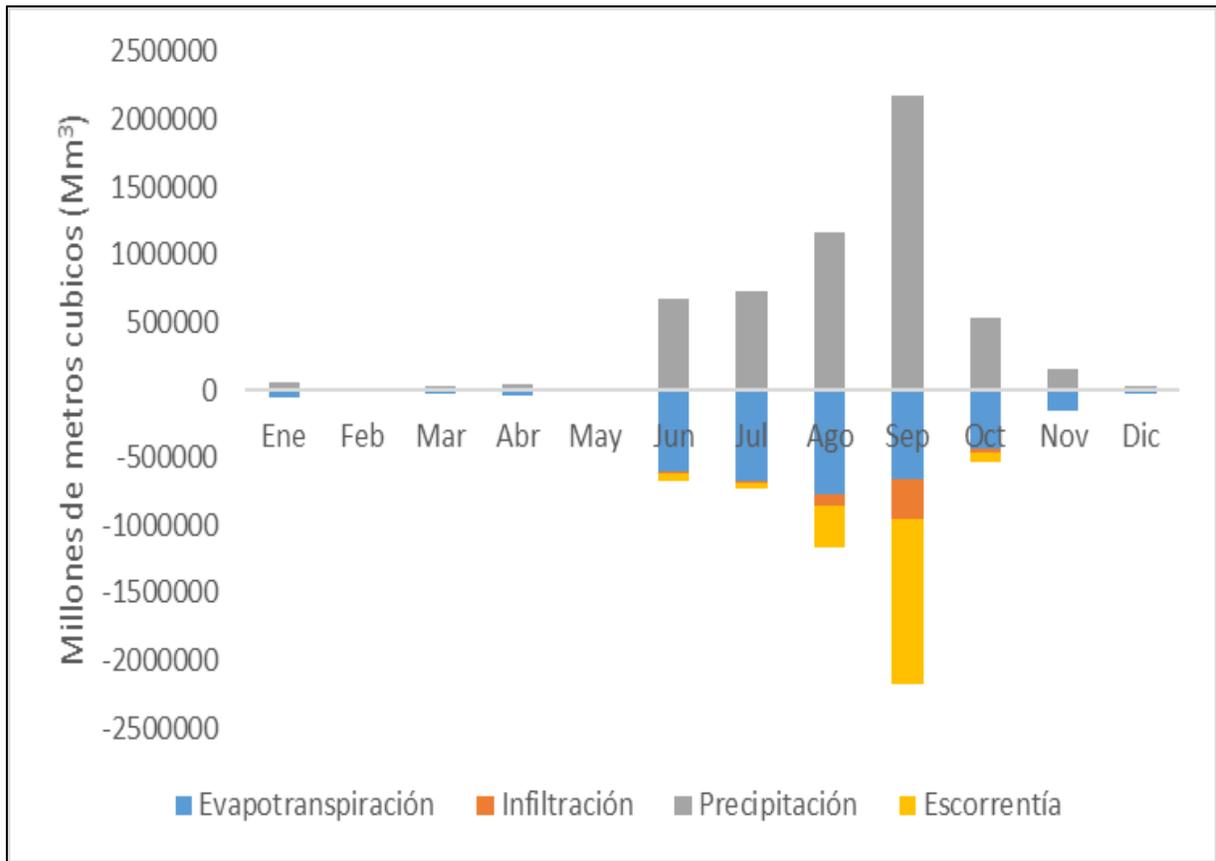


Figura 16. Simulación del balance de agua con WEAP, de la cuenca de la Cañada Grande del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala.

Escenarios del balance de agua en la microcuenca de La Cañada PNLM

Utilizando los datos del análisis de los años hidrológicos (1998 a 2019) (Fig. 12), se generaron escenarios del balance de agua para los diferentes años hidrológicos (muy húmedo, húmedo,

normal, seco y muy seco). La precipitación disminuyó en un 6% para años muy secos e incrementó en un 7%, 14% y 20% para años normales, húmedos y muy húmedos, respectivamente, con relación al año base (seco). La evapotranspiración, disminuyó en un 4% para años muy secos e incrementó en un 3%, 6% y 7%, para años normales, húmedos y muy húmedos, respectivamente, con relación al año seco. La escorrentía e infiltración, presentaron un comportamiento similar de disminución de 11% para los años Muy secos y un incremento del 14%, 31% y 49%, para años Normales, Húmedos y Muy húmedos, respectivamente, con respecto al año base (seco), (Fig. 17).

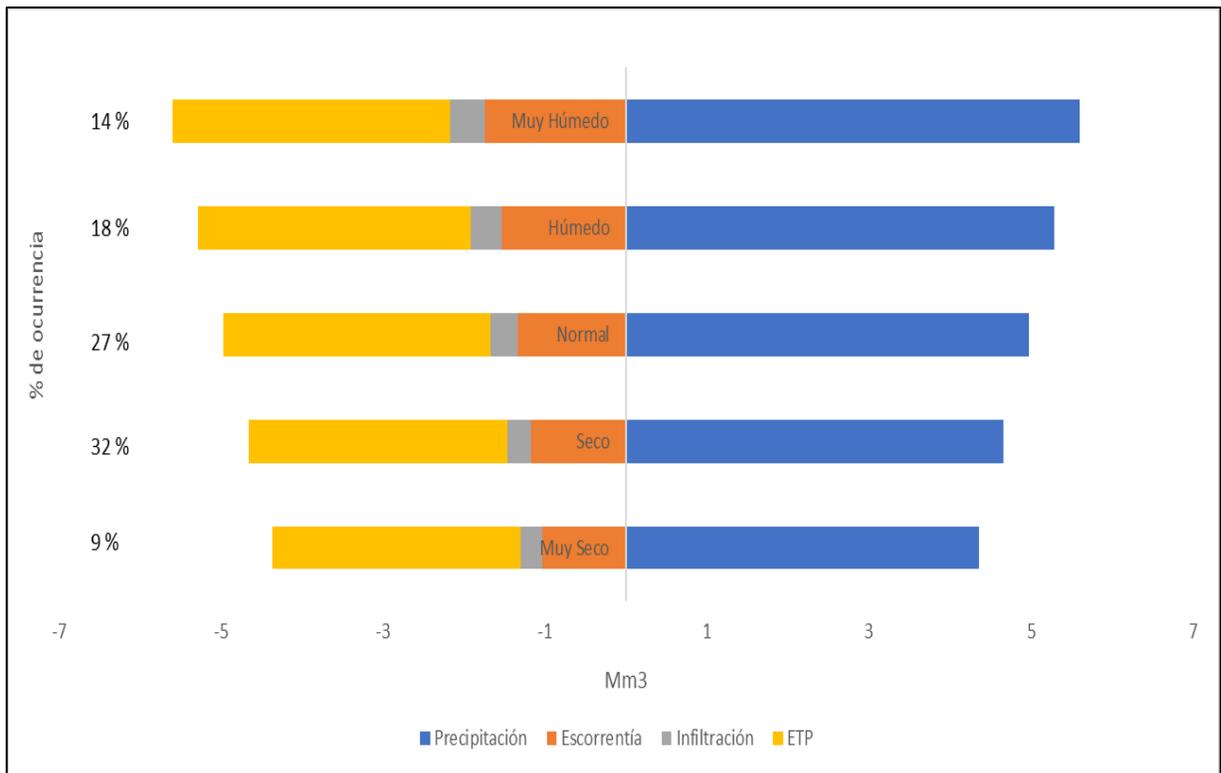


Figura 17. Balance de agua para escenarios de años hidrológicos de la microcuenca de Cañada Grande del PNLN, Tlaxcala, Méx.

Discusión

La caracterización de la microcuenca mediante uso de sistemas de información geográfica ha sido de mucha utilidad como lo reportan Ojeda Zújar *et al.* (2013) y Del Aguila *et al.* (2021), lo cual nos permite comprender el comportamiento de la hidrología de la cuenca de una manera más eficaz.

Los pobladores de las comunidades de Pilares e Ixtenco, comentan que existió un arroyo antes que secuestraran el agua de los manantiales, por esta razón suponemos que la corriente principal de la microcuenca debería ser permanente, ya que según las mediciones del gasto de los dos tubos que conducen el agua a los poblados, muestran valores suficientes para generar un arroyo de 2.5 Km de longitud, que tendría un impacto positivo en la biodiversidad de la microcuenca (Nolasco, 2021).

La cobertura vegetal se encuentra en buenas condiciones y solamente se encuentra desprovista de cubierta vegetal la parte alta de la microcuenca, debido al tipo suelo y condiciones climáticas dadas por la altitud.

El porcentaje de la pendiente del cauce principal, así como de sus tributarios, ocasiona que los escurrimientos por precipitación sean breves y proporcionales en su magnitud a la tasa de precipitación pluvial (McCuen, 2004).

Con relación a la información utilizada para la estimación de los parámetros de los modelos, las fuentes ya han sido validadas en trabajos como los de Alarcón-Africano & Díaz-Suescún (2018), en un trabajo similar a éste estudio, sobre balance de agua en una cuenca de Colombia.

Se logró simular el comportamiento hidrológico de la microcuenca con el uso de WEAP, que sobrepasa los requerimientos de la NOM-011-CONAGUA-2015, al generar información más detallada de la disponibilidad de agua y de todo el ciclo hidrológico. La disponibilidad de agua de la microcuenca fue subestimada con la metodología de la NOM-011-CONAGUA-2015 simulada con Stella, en un 25%, esto es aceptable, ya que, para fines prácticos, es mejor planear el uso del agua disponible en menor cantidad, que sobrepasar su disponibilidad. La estructura

del modelo de simulación en WEAP, concuerda con los resultados obtenidos en otros estudios hechos por Suarez *et al.* (2009), Laino *et al.* (2017) y Chamizo *et al.* (2019), realizados en condiciones variadas de cuencas en México, mostrando una buena representación en la simulación de la disponibilidad y demanda de agua a escala cuenca hidrográfica. Por otro lado, Alarcón-Africano & Díaz-Suescún (2018), corroboran el uso de modelos de simulación para la toma de decisiones en la gestión del agua, aplicado a la estimación del potencial de abastecimiento de un acueducto, para seis regiones del municipio Nunchia, Colombia.

Los manantiales escurrieron entre octubre de 2020 a septiembre 2021, 141 112 m³, equivalente al 12% de las escorrentías por precipitación pluvial en la microcuenca, para ese mismo periodo. El 33.4% de ésta agua se condujo a la comunidad de Ixtenco y se distribuyó entre 150 personas, a una proporción de 314.2 m³ anuales per cápita, es decir, 860.8 litros diarios por persona, cantidad que sobrepasa los valores promedio reportados para el estado de Tlaxcala de 298.6 litros diarios por persona (Suarez *et al.*, 2009), sin embargo, dependen de la variabilidad natural y la generada por situaciones de ruptura u obstrucción de los tubos, por lo que experimentan épocas de escasez de agua a lo largo del año. El 66.6% restante del agua de los manantiales la condujeron a la comunidad de Pilares y la distribuyeron entre 1682 personas, a una razón de 83.9 m³ anuales per cápita, es decir 229.8 litros diarios por persona, insuficiente para cubrir las necesidades promedio per cápita comparados con las de los habitantes para el estado de Tlaxcala, a esto hay que agregar la variabilidad natural y la ocasionada por la ruptura y obstrucción de los tubos, que ocasiona más periodos de escasez de agua que en Ixtenco, a lo largo del año. Este comportamiento de desabasto de agua observado, concuerda con la situación que atraviesa la mayor parte de las comunidades del centro de México y su área metropolitana, de escasez de agua para una población de 28 millones de habitantes del centro de México (CONAGUA-SEMARNAT, 2018). Con las tasas de crecimiento poblacional para estas comunidades de 1% anual (INEGI, 2021), aunado a que se proyecta una disminución en la precipitación pluvial para esta región debido al cambio climático global (PEAC, 2014), la demanda de agua tarde o temprano sobrepasará la disponibilidad para esta región, por lo que será necesario implementar estrategias para la captación y abastecimiento de agua en estas dos comunidades. Por otro lado, sin considerar las variaciones en tiempo y los aportes por las

escorrentías ocasionadas por la lluvia, si se liberan los manantiales, se podría tener un flujo promedio base de 4.5 l/s. Por esta razón, se considera recomendable prevenir la escasez de agua para las dos comunidades, utilizando los métodos más adecuados y liberar los manantiales para beneficiar a la biodiversidad de la microcuenca; como lo reportaron Nolasco (2012) y Castro (2018), podemos aseverar que el agua es un recurso importante para la biodiversidad, mediante lo observado en sus estudios en estanques artificiales. Para lograr una gestión sustentable del agua en esta microcuenca, es muy importante tomar en cuenta la ley del caudal Ecológico y utilizar las simulaciones del modelo para generar escenarios de diferentes estrategias de manejo que satisfagan dicha ley, como lo reportaron Alarcón-Africano & Díaz-Suescún (2018), en su estudio sobre cuidar los límites mínimos del caudal ecológico para sostener la flora y fauna de una cuenca que abastecerá de agua a 6 comunidades en Colombia.

Una forma alternativa de mejorar la disponibilidad de los recursos hídricos y evitar la pérdida de ecosistemas por deforestación en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), ha sido conservar los bosques de las regiones montañosas, para mejorar los servicios ecosistémicos asociados a la captación de lluvia, infiltración, escorrentía y recarga de acuíferos, como lo mencionan López-García & Navarro-Cerrillo (2021), en su trabajo realizado en los bosques que rodean a la Ciudad de México (Sierras de Las Cruces-Ajusco-Chichinautzín); que corresponde a la misma cadena montañosa que el presente estudio; esto nos hace suponer, que tienen problemas similares la FVT, centrados en el recurso hídrico, por eso la importancia de conservar los recursos naturales y el manejo del agua; de igual modo existe una deforestación importante en toda la FVT que afecta el proceso de infiltración y por consecuencia una pérdida importante en la disponibilidad de agua en las microcuencas de cada región, donde existe una gran deforestación ocasionada por las poblaciones aledañas. Por lo que los resultados de este trabajo se pueden replicar y extrapolar a otras microcuencas de la FVT.

Una alternativa para poder recuperar el bosque de la microcuenca y evitar la tala, será hacer hincapié en los Servicios Ecosistémicos (SE) que otorga la microcuenca y la región, como lo reportaron Perevochtchikova & Sandoval-Romero (2020), en una investigación de estos servicios y participación ciudadana a través de un monitoreo comunitario participativo, para incluir a la sociedad y darles a conocer los impactos negativos que generan al bosque sus

acciones. Para subsanar y mitigar los impactos negativos al bosque por las acciones de las comunidades, se pueden obtener recursos a través del Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), otorgados por el gobierno de México, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Esto ya fue evaluado por Mora-Carvajal *et al.* (2019), utilizando mapas de las áreas forestales de comunidades aledañas en la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl, lo cual se puede replicar en la región de la microcuenca de Cañada Grande, para evitar la tala, recuperar el bosque de la región y obtener un recurso para las comunidades, el cual podría destinarse para implementar estrategias de captación y abastecimiento de agua en estas dos comunidades.

La caracterización de los años hídricos, muestra una amplia variabilidad de 10% para cada intervalo de clase, comparado con lo observado en la región del sistema Guayalejo-Tamesí, de 2.5%, Sánchez-Torres *et al.* (2011). Esto permite suponer que la región de estudio tendrá mayores impactos en el ecosistema debido a consecución de años secos y muy secos (40%), dado por la amplitud de la variabilidad de los años hidrológicos, lo que se puede reflejar en mortalidad de árboles por estrés hídrico y consecuente presencia de plagas (Allen, 2009). El conocimiento de la distribución de los años hídricos, se puede utilizar para predecir el comportamiento de la humedad del suelo en la Cañada Grande y tomar medidas preventivas para evitar la mortalidad de los árboles y la consecuente presencia de plagas, por ejemplo, lo reportado por Momiyama *et al.* (2021), sobre aclareo del bosque durante periodos de sequía hidrológica en Japón.

Del total de la lluvia anual registrada en la microcuenca para el año 2019, que fue de 4.65 millones de m³, el 68.6% se evapotranspiró, el 6.3% se infiltró y el 25.1% se escurrió; estos valores se acercan a los observados en la cuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, por Suarez *et al.* (2009), de 65%, 5% y 30%, respectivamente, las variaciones se pueden deber a que existe mayor cobertura vegetal en la microcuenca de la Cañada Grande, por lo tanto mayor evapotranspiración; el suelo y las rocas de la microcuenca en estudio son más permeables que las arcillas de la cuenca del río Zahuapan, como consecuencia el agua que sobra para escorrentía es menor.

Los escenarios generados para los 4 tipos de años hidrológicos utilizando el año base observado (año seco), muestran variabilidades diferenciadas para cada componente del ciclo hidrológico, 7% para la precipitación, 3% para la evapotranspiración y 15% para la escorrentía e infiltración. Debido a la gran variabilidad natural que tiene la precipitación pluvial en la microcuenca, los años secos y muy secos, tornan vulnerable el ecosistema de la microcuenca, ya que una reducción paulatina en la humedad del suelo (debido a la disminución de la infiltración), puede ocasionar muerte regresiva del bosque (Allen, 2009).

Otro factor muy importante a considerar en la gestión del agua en la microcuenca de la Cañada Grande, es la cosmovisión de las comunidades con respecto a la Montaña (PNLM), identificado en las entrevistas aplicadas a los pobladores de las comunidades de Pilares e Ixtenco, de origen Otomí; que ven a la Montaña como un ente sagrado, que les provee de recursos, por lo que para utilizarlos deben de pedirle permiso y ofrecerle ofrendas, que de lo contrario creen que la Montaña se enoja y les ocasiona mal clima, temblores, caída de rocas, ruptura de los tubos, entre otras cosas. Este factor ya fue estudiado por Hernández-Baustista (2020), sobre la antropología del agua en los habitantes de las comunidades aledañas al volcán Iztaccíhuatl, que lo consideran como un “monte sagrado”, que les provee de agua y otros recursos.

Conclusiones

Cañada Grande es una microcuenca muy pequeña, de 7.2 km² de superficie, cubierta de bosque de pino (25.91%), bosque de oyamel (43.69%), pradera de montaña (18.09%), pastizal inducido (2.84%) y 9.47% desprovisto de vegetación. Con un rango de altitud de 3073 a 4408 msnm. Su canal principal es de 5.12 km de longitud, es intermitente, con una pendiente de 26%. Es una cuenca geológicamente joven. Tiene tres tipos de suelo, Regosol (10.45%), Litosol (52.43%) y Fluvisol (37.12%). Su clima es frío en su mayoría y semi-frío en la parte baja, con verano fresco y largo.

La caracterización de la microcuenca de la Cañada Grande, permite comprender el comportamiento de su hidrología de manera más eficaz. La escorrentía por precipitación es breve y proporcional en su magnitud a la tasa de precipitación pluvial. La cubierta vegetal en

buen estado, está asociada a los valores de evapotranspiración. La permeabilidad dada por el tipo de suelo y las rocas, propician una mayor infiltración que en otras localidades del estado de Tlaxcala.

Considerando la ley del caudal ecológico y utilizando simulaciones del modelo para generar escenarios de diferentes estrategias de manejo que satisfagan dicha ley y aprovechando el programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH), otorgado por el gobierno de México, a través de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), podría ser una opción para obtener recursos económicos, los cuales se podrían aplicar para subsanar y mitigar los impactos negativos causados por las actividades de las comunidades en la microcuenca, así como la implementación de estrategias de captación y abastecimiento de agua para las comunidades de Ixtenco y Pilares, así poder liberar los manantiales para generar un arroyo permanente de una longitud de 2.5 km a partir de los manantiales, con un impacto positivo en la biodiversidad de la Cañada Grande.

La disponibilidad anual de agua superficial es de 1.46 millones de m³ y subterránea de 0.29 millones de m³.

Los pobladores de Ixtenco tienen un abastecimiento de 860 litros diarios por persona y los de Pilares 229.8 litros diarios por habitante. La comunidad de Pilares se encuentra por debajo de los valores de demanda de agua reportados para Tlaxcala.

La precipitación pluvial durante el año base (2019), fue de 4.65 millones de m³, el año está clasificado como seco, con un periodo de lluvia de 5 meses de junio a octubre. Del agua precipitada el 68.6% se evapotranspira, el 6.3% se infiltra y el 25.1% se escurre.

Los modelos de simulación son una herramienta útil para la gestión integral del recurso hídrico de las microcuencas. La estructura del modelo WEAP utilizada en este trabajo, simula adecuadamente la hidrología de la microcuenca de Cañada Grande y concuerda con la utilizada por otros autores para microcuencas de México. El software WEAP permitió simular la disponibilidad y demanda de la microcuenca, con la estructura elaborada y sobrepasa las

exigencias de la NOM-011-2015 simulada con Stella, para dichos cálculos, además permite generar escenarios orientados a la gestión integral del recurso hídrico.

Los años hídricos secos son los que tienen la mayor probabilidad de ocurrencia (0.32), después los normales (0.27) y finalmente los húmedos (0.18). En los extremos de la distribución temporal están los muy húmedos (0.14) y los muy secos (0.09).

La variabilidad de la precipitación en los años hidrológicos, fue del 10% por intervalo de clase, que es relativamente muy amplio comparado con otra región de México (2.5%). Esto hace vulnerable al bosque de la cuenca a sequías acumulativas y por tanto al ataque de plagas. Los conocimientos sobre el comportamiento de los años hídricos en la microcuenca, permitirá tomar medidas preventivas para evitar la mortalidad de los árboles y la consecuente presencia de plagas.

Los escenarios para los tipos de años hidrológicos, muestran incrementos y decrementos con relación al año base de 3% y 7%, para evapotranspiración y precipitación, respectivamente, así como 15% para escorrentía e infiltración.

Se espera que las comunidades de Ixtenco y Pilares, debido a su crecimiento poblacional y al cambio climático, experimente un desabasto de agua a futuro si siguen dependiendo del agua de los manantiales, por lo que se recomienda iniciar acciones encaminadas a utilizar otros tipos de abastecimiento de agua, como son, pozos, presas, cosecha de agua, entre otros.

Un factor importante a considerar en la gestión integral del agua en la microcuenca es la cosmovisión de las comunidades de Pilares e Ixtenco, que consideran a la Montaña (PNLM), como un ente sagrado.

Los resultados obtenidos en este trabajo sobre la disponibilidad y demanda de agua, se pueden replicar y extrapolar a otras microcuencas de la Faja Volcánica Transmexicana.

Referencias

Acuña Andrey, N. (2018) Acción colectiva y funcionamiento institucional en el conflicto entre las localidades de Ixtenco y Los Pilares por la apropiación de los recursos hídricos del parque nacional La Malinche, Tlaxcala.

Agua.org.mx. (s.f.). agua.org.mx. Recuperado el 23 de junio de 2019, de <https://agua.org.mx>

Alarcón-Africano, J. G., & Díaz-Suescún, L. L. (2018). Estudio hidrológico y balance hídrico para determinar la oferta y la demanda de agua de la cuenca de la quebrada Niscota para un acueducto interveredal en Nunchía, Casanare.

Allen, C. D. (2009). Muerte regresiva del bosque inducida por el clima: ¿un fenómeno mundial en aumento. *Unasylva*, 60(231-232), 43-49.

Antonio, M. D. L. Á. G., Hernández, H. R., Mireles, L. E. M., & Benavides, A. C. (2014). Disponibilidad y uso eficiente de agua en zonas rurales. *Investigación y ciencia*, 22(63), 67-73.

Blanco, M. S., & Pascual-Aguilar, J. A. (2020) Desarrollo de un modelo de balance hídrico en la cuenca alta del Río Negro (Uruguay): Análisis de la disponibilidad de agua en diferentes escenarios. *Escenarios de Cambio Climático en Colombia y Uruguay. Explorando el modelo hidrológico hydrobid*, 57.

Breña, P. A., & Breña, N. J. A. (2007). Disponibilidad de agua en el futuro de México. Recuperado de https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/58_3/PDF/09-550.pdf.

Carreón, M. (2008). Evaluación y planeación del recurso agua en la subcuenca del río Zahuapan. Tlaxcala: Tesis de maestría en Ciencias Ambientales.

Castro Cuamatzi HM (2018). Patrones de actividad diaria y abundancia de los mesocarnívoros asociados a la presencia de estaques artificiales en La Malinche, Tlaxcala. Tesis. Maestría en Ciencias Biológicas, UATx.

Chamizo-Checa, S., Otazo-Sánchez, E., Gordillo-Martínez, A., Suárez-Sánchez, J., González-Ramírez, C., & Muñoz-Nava, H. (2020). Megacity wastewater poured into a nearby basin: looking for sustainable scenarios in a case study. *Water*, 12(3), 824.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (2014). Estrategia hacia 2040: una orientación para la conservación de las áreas naturales protegidas de México. México: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA. (2012). NMX-AA-159-SCFI-2012. Diario Oficial de la Federación.

CONAGUA. (2015). Conservación del recurso agua. Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. DOF.

CONAGUA-SEMARNAT (2018) Estadísticas del Agua en México. Edición 2018. México. 303 p. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf

Del Aguila, S., & Mejía, A. (2021). Caracterización morfométrica de dos cuencas altoandinas del Perú utilizando sistemas de información geográfica. *Tecnología y ciencias del agua*, 12(2), 538-562.

Gil Antonio, María de los Ángeles, & Reyes Hernández, Humberto, & Márquez Mireles, Leonardo Ernesto, & Cardona Benavides, Antonio (2014). Disponibilidad y uso eficiente de agua en zonas rurales. *Investigación y Ciencia*, 22(63),67-73.

Hernández Bautista, I. D. R. (2020). La construcción simbólica del paisaje en el Volcán Iztaccíhuatl: Nahualac, un templo de nahuales de agua. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

INEGI. (2014). Anuario estadístico y geográfico de Tlaxcala.

INEGI (2021) Catalogo de Localidades.

Laino-Guanes, R., Suárez-Sánchez, J., González-Espinosa, M., Musálem-Castillejos, K., Ramírez-Marcial, N., Bello-Mendoza, R., & Jiménez, F. (2017). Modelación del balance hídrico

y el movimiento de nutrientes utilizando WEAP: limitaciones para modelar los efectos de la restauración forestal y el cambio climático en la cuenca alta del río Grijalva. *Aqua-LAC*, 9(2), 46-58.

Llaguno MJ, Torres TE, Valera PM. 2009. El Clima y el Futuro del Recurso Agua en la Microrregión de La Malinche. *Design*, 1–10.

López-García, J., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2021). Changes in the constituents of the “Bosque de Agua” of the Sierra Cruces-Ajusco-Chichinautzín, Mexico, an area with payment for environmental services. *Environmental Earth Sciences*, 80(20), 1-14.

Martínez-Austria, P. F., & Vargas-Hidalgo, A. (2016). Modelo dinámico adaptativo para la gestión del agua en el medio urbano. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 139-154.

Martínez-Austria, Polioptro F., & Patiño-Gómez, Carlos. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-20.

McCuen, R. H. (2004). Hydrologic analysis and design. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(3), 838.

McDowell, N., Pockman, W.T., Allen, C.D., Breshears, D.D., Cobb, N., Kolb, T., Sperry, J., West, A., Williams, D. y Yezpez, E.A. 2008. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *Tansley Review. New Phytologist*, 178: 719–739.

Méndez-De La Cruz, F. R., Díaz De La Vega-Pérez, A. H., Centenero-Alcalá, E., & Jiménez-Arcos, V. H. (2018). *Anfibios y Reptiles del Parque Nacional La Malinche*. Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala, México.

Momiyama, H., Kumagai, T. O., & Egusa, T. (2021). Model analysis of forest thinning impacts on the water resources during hydrological drought periods. *Forest Ecology and Management*, 499, 119593.

Monterroso-Rivas, A. I., Ramírez-García, A. G., Gómez-Díaz, J. D., Velázquez-Juárez, Y., & Rendón-Medel, R. (2016). Cambio en la disponibilidad hídrica futura en un bosque mesófilo de montaña de México. *Interciencia*, 41(4), 266-272.

Montilla-López, N. M., Gutiérrez-Martín, C., & Gómez-Limón, J. A. (2017, September). Simulación del desempeño potencial de los bancos de agua: el caso de la cuenca del Guadalquivir. In XI Congreso de la Asociación Española de Economía Agraria (p. 101).

Montero, I.A. (2012). Matlalcueye, el volcán del alma Tlaxcalteca. Tlaxcala: Gobierno del Estado de Tlaxcala.

Mora-Carvajal, Manuel Jacobo, Bustamante-González, Angel, Cajuste-Bontemps, Lenom, Vargas-López, Samuel, Cruz Bello, Gustavo Manuel, & Ramírez-Juárez, Javier. (2019). Pago por servicios ambientales hidrológicos y dinámica de la cobertura arbórea en la región Iztaccíhuatl-Popocatepetl, Puebla, México. *Acta Agronómica*, 68(2), 84-91. <https://doi.org/10.15446/acag.v68n2.66291>

Morales-Acoltzi, T. & Bernal-Morales R. (2014). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático Estado de Tlaxcala, México. (PEAC). Universidad Autónoma de Tlaxcala. ISBN: 978-607-9348-70-0.

Nolasco P. A. (2012). Importancia de Estanques Artificiales para la Conservación de la Biodiversidad en Tres Sitios del estado de Tlaxcala. Tlaxcala: Tesis de Maestría.

Ojeda Zújar, J., Díaz Cuevas, M. D. P., Prieto Campos, A., & Álvarez Francoso, J. I. (2013). Línea de costa y Sistemas de Información Geográfica: modelos de datos para la caracterización y cálculo de indicadores de la costa andaluza. *Investigaciones geográficas*, 60, 37-52.

Olabanji, M. F., Ndarana, T., Davis, N., & Archer, E. (2020). Climate change impact on water availability in the olifants catchment (South Africa) with potential adaptation strategies. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 120, 102939.

ONU (2019). Las montañas y los recursos hídricos están en peligro, una Cumbre busca soluciones. Recuperado de: <https://news.un.org/es/story/2019/10/1464521>

Perevochtchikova, María, & Sandoval-Romero, Gabriel Eduardo. (2020). Monitoreo comunitario participativo del agua en la periferia suroeste de la Ciudad de México. *Investigaciones geográficas*, (103), e60063. Epub 09 de marzo de 2021. <https://doi.org/10.14350/riig.60063>

Pérez, F. C., & Tucker, T. M. (2009). Matlalcuéyatl: visiones plurales sobre cultura, ambiente y desarrollo. Colegio de Tlaxcala, AC.

Pérez, M. E. V., Ibarra, R. M., Guerrero, G. G., & Suárez, Y. R. B. (2018). Diagnóstico social y económico de los municipios del Parque Nacional Malinche. Adaptación a los cambios ambientales y territoriales, 71.

McCuen, R. H. (2004). Hydrologic analysis and design. *Journal of the American Water Resources Association*, 40(3), 838.

Salazar, A., & Pineda, N. (2010). Factores que afectan la demanda de agua para uso doméstico en México. Scielo, pág. 49. Recuperado el 28 de 06 de 2019.

Sanchez-Torres Esqueda, G., Ospina-Noreña, J. E., Gay-García, C., & Conde, C. (2011). Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesí river basin, Tamaulipas, México. *Atmósfera*, 24(1), 141-155.

SEMARNAT (2016). Parque Nacional La Malinche o Matlalcuéyatl.

SEMARNAT. (2012). Disponibilidad del agua. En SEMARNAT, Agua.

Suarez, J., Muñoz, H., Orozco, S., Sanchez, G., Ritter, W., Carreon, F., . . . Treviño, J. (2009). Disponibilidad de agua y el cambio climático global en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, Méxco. *Gestion Ambiental*, 49-61.

TOLEDO, A. El agua en México y en el mundo. *Gaceta Ecológica*, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 64: 9-18, 2002.

VW, V. (2014). Informe de la biodiversidad en la Malinche. Tlaxcala.

WWF, A. (2011). Guía rápida para la determinación de caudales ecológicos.